Limite de Traqueamento de Plataformas Aéreas por Radares Operando na Banda X

Nohara[1], E. L., Rezende[2], M. C.
Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade de Taubaté, Rua Daniel Danelli, s/n, Taubaté – SP, CEP 12060-440
Divisão de Materiais/Instituto de Aeronáutica e Espaço/Centro Técnico Aeroespacial, Av. Brigadeiro Faria Lima, 1941, São José dos Campos – SP, CEP 12227-270

***Resumo* — Plataformas aéreas são traqueadas (interceptadas) utilizando radares operando na banda X do espectro eletromagnético. Em 1985 os EUA realizaram uma série de disparos com mísseis equipados com radares de traqueamento na banda X contra alvos de diversos tamanhos. Cerca de 12% dos mísseis erraram os alvos, uma vez que possuíam um tamanho físico reduzido que impossibilitou o traqueamento. O RCS mínimo para traqueamento está em torno de 1,0 m^2. Entretanto, para uma aeronave não ser detectada pelos modernos sistemas radares seu valor deve estar em 0,001 m^2, valor impossível de ser atingido para uma aeronave. O presente artigo discute as questões táticas da redução da assinatura radar para aeronaves furtivas pelo emprego de materiais absorvedores em diversas faixas de freqüência.**

***Palavras-chaves* — Traqueamento, plataformas aéreas, RCS, banda X.**

I. INTRODUÇÃO

Os radares de vigilância do espaço aéreo, traqueamento, e mapeamento topográfico operam nos limites de freqüências relacionadas na Tabela 1. Essas bandas de freqüências cobrem o espectro eletromagnético de 3 MHz a 300 GHz, sendo que a maioria dos radares de uso aeronáutico operam na faixa de microondas, designadas como bandas L, S, C, X e K_u. A Tabela 1 também descreve os usos típicos de cada banda do espectro eletromagnético [1].

As freqüências de VHF e UHF são geralmente utilizadas em radares de vigilância de longo alcance, devido à sua característica de cobrir distâncias acima do horizonte [2]. Entretanto, para obter uma boa precisão angular a baixas freqüências há necessidade de emprego de antenas de grande porte. Assim, essas faixas de freqüências são somente utilizadas quando suas características únicas de propagação a longas distâncias são necessárias.

Sem considerar alguns fatores como potência do sinal, ganho da antena, tipo de relevo, vegetação, condições atmosféricas, entre outros, um sistema de vigilância aérea baseado em solo, operando na banda S pode ser capaz de cobrir uma área de 400 km de raio, e um sistema operando na banda X possui capacidade de traqueamento de alvos com alta precisão em torno de 90 km [2]. Sistemas de radar incorporados em helicópteros para identificação de alvos em solo (carros de combate, armamento, pessoas), como utilizado pelo helicóptero Apache (desenvolvido pela McDonnell Douglas - Boeing), com radar operando na freqüência de 35 GHz, possuem capacidade de traqueamento em torno de 5-6 km.

Dentre as bandas de freqüência do espectro eletromagnético, a faixa de freqüências compreendidas entre 8-12 GHz, também denominada banda X (Tabela 1), é utilizada pelos radares com alta resolução de detecção, identificação e traqueamento de alvos, como os encontrados em sistemas de defesa anti-aérea baseados em terra e mísseis guiados [1,2]. Neste contexto, três aspectos podem ser analisados na aplicação de MARE em aeronaves [3]:

1. Capacidade de furtividade contra mísseis lançados por sistemas de defesa anti-aérea baseados em terra.
2. Capacidade de furtividade contra mísseis lançados em combate ar-ar.
3. Entrada de aeronaves em território hostil.

TABELA I. FAIXA DE FREQÜÊNCIA DAS BANDAS DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO E SEU USO GERAL [1].

Designação da banda	Faixa de Freqüência (MHz)	Utilização
HF VHF UHF	3-30 30-300 300-1.000	Sistemas de vigilância aérea de altíssimo alcance
L	1.000-2.000	Sistemas de vigilância aérea de longo alcance, controle de rotas de tráfego aéreo
S	2.000-4.000	Sistemas de vigilância aérea de médio alcance, controle próximo de tráfego aéreo, radares meteorológicos de longo alcance
C	4.000-8.000	Monitoramento a longas distâncias, radares meteorológicos aero-embarcados
X	8.000-12.000	Monitoramento a curtas distâncias, sistemas guias de mísseis, radar marinho, sistemas de interceptação de aeronaves
K_u	12.000-18.000	Mapeamento de alta resolução, altimetria de satélites
K	18.000-27.000	Pouco utilizado devido à interferência com o vapor de água
K_a	27.000-40.000	Mapeamento de altíssima resolução, sistemas de vigilância de aeroportos
Milimétrica	40.000-300.000	Experimental

Normalmente, os radares de um sistema de vigilância e defesa anti-aérea, baseados em solo operam nas bandas UHF, L, S, C ou e X (Tabela I). Os radares primeiramente realizam a varredura do espaço aéreo utilizando as bandas UHF, L, S ou C, uma vez que permitem cobrir grandes distâncias. Após a detecção do alvo no espaço aéreo vigiado, o sistema de defesa aérea faz o traqueamento em alta resolução do alvo utilizando a banda X, para obtenção de informações como altura, velocidade e azimute [2].

Por exemplo, o sistema móvel de artilharia anti-aérea russo "SA-6 Gainfui ZRK-SD Kub" é transportado em dois veículos (Figura 1), um deles transporta o sistema radar e o outro os mísseis. A antena na banda S é utilizada para

Evandro Luís Nohara, evandro@unitau.br, Tel +55-12-3625419; Mirabel Cerqueira Rezende, mirabel@iae.cta.br, Tel +55-12-39476420. Este trabalho foi financiado pela FAPESP (projeto 98/15839-4).

vigilância do espaço aéreo, com uma faixa de alcance de 55-75 km. A antena na banda X é utilizada para detecção, identificação e traqueamento dos alvos com alta resolução, dentro de uma faixa de alcance igual a 28 km. Após o lançamento do míssil, seu vôo é guiado em direção ao alvo com informações provenientes do radar em terra operando na banda X.

Figura 1. Sistema móvel de artilharia anti-aérea russo "SA-6 Gainfui ZRK-SD Kub", composto por um veículo radar e um veículo lançador de mísseis.

Em uma situação de entrada de uma aeronave hostil em espaço aéreo vigiado, a ação será a destruição da aeronave intrusa. As etapas de lançamento de um míssil para derrubar a aeronave hostil podem ser divididas em 4 partes [3,4]:

1. O sistema de defesa anti-aéreo baseado em terra irá detectar a aeronave hostil, e realizará o lançamento de um míssil.

2. Durante o vôo do míssil, dentro da faixa de alcance da estação em terra, o míssil é guiado com informações de longitude, latitude, velocidade e altitude do alvo, recebidas da estação em terra. As estações de terra possuem radares com grande diâmetro e alta potência, por exemplo, diâmetros maiores que 19 metros e potência acima de 100 kW, permitindo assim, um rastreamento preciso em longas distâncias.

3. Após determinada distância, quando a estação de terra já não permite mais guiar o míssil com precisão, entra em operação o sistema de traqueamento do míssil, que possui uma potência bem menor no seu radar, da ordem de 100 W, e com antenas com diâmetro em torno de 120 mm.

4. A estação em terra pode detonar o míssil via rádio.

Para fazer com que o míssil não tenha sucesso no seu objetivo, isto é, a sua atuação no alvo, é necessário cancelar uma dessas 4 fases. Cada uma dessas 4 fases possui uma distância crítica de operação, ou seja, após certa distância os radares já não conseguem mais traquear o alvo com precisão. A distância crítica é determinada por 2 parâmetros: 1. Potência utilizada nos sistemas radar e 2. Tamanho da antena.

A potência mais alta de todos os equipamentos é da estação em terra, pois permite a instalação de vários geradores. Em termos de potência, o lado mais fraco é o radar do míssil. Portanto, a ação deve ser dirigida totalmente para o míssil. Em 1985, os Estados Unidos da América realizaram vários experimentos com mísseis equipados com radar autônomo de altíssima resolução e precisão no traqueamento de alvos móveis (mísseis não guiados por bases em terra). Foram realizados por volta de 80 disparos, sendo que 70 atingiram os objetivos. A razão do fracasso dos outros 10 disparos era a baixa seção reta radar dos alvos. Os resultados demonstraram que o valor limite detectável de seção reta radar pelo sistema radar do míssil era igual a 1,0 m^2, valores inferiores não eram detectados pelos mísseis mais sofisticados [3.

A seção reta radar, também denominada *Radar Cross Section* (*RCS),* com unidade em metros quadrados, está relacionada com a densidade de potência refletida, e não com a área real de um determinado alvo. De acordo com o equacionamento da seção reta radar, a densidade de potência do sinal refletido por uma placa plana com incidência normal do sinal é definido pela equação 1, onde a e b são as dimensões da placa, e λ o comprimento de onda [1].

$$\sigma = \frac{4\,\pi\,a^2 b^2}{\lambda^2} \qquad (1)$$

Assim, uma placa plana com dimensões de 0,097 m x 0,097 m a 9,0 GHz, possui uma seção reta radar igual a σ = 1,0 m^2 (Figura 2 – em escala 1:2). Na Figura 2 está representado um radar que possui sistema de transmissão e recepção do sinal no mesmo ponto (condição monoestática – figura na parte inferior).

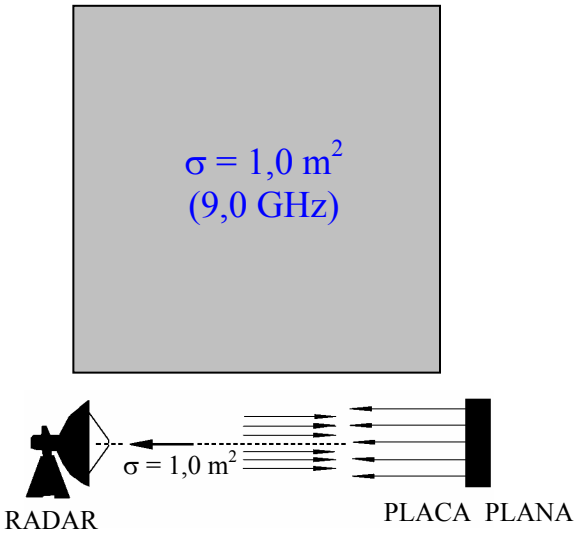

Figura 2. Relação da seção reta radar com a área física (σ = 1,0 m^2, f = 9,0 GHz, dimensões: 0,097 m x 0,097 m – escala 1:2).

Se um determinado objeto, por exemplo um míssil, possui um valor de RCS igual a 1,0 m^2 em 9,0 GHz em um determinado ângulo de aspecto, este objeto reflete a mesma densidade de potência de uma placa plana com dimensões iguais a 0,097 m x 0,097 m, colocada na mesma posição do míssil. Assim, um míssil com σ = 1,0 m^2, a 100 km do sistema radar (f = 9,0 GHz), apresenta o mesmo valor de RCS ao de uma placa plana com dimensões de 0,097m x

0,097m, localizada na mesma posição do míssil (100 km de distância).

Com a atual sofisticação e poder de resolução dos radares de vigilância aérea (sistemas baseados em terra), sabe-se que é praticamente impossível penetrar com aeronaves em um sistema de defesa aérea sem ser detectado. Para uma aeronave não ser detectada, sua seção reta radar deve estar em torno de 0,001 metros quadrados [3].A Figura 3 mostra a relação do valor da seção reta radar com a área física real de uma placa plana, em 3,0 GHz (0,030 m x 0,030 m, em escala 1:2) e em 9,0 GHz (0,017 m x 0,017 m, em escala 1:2).

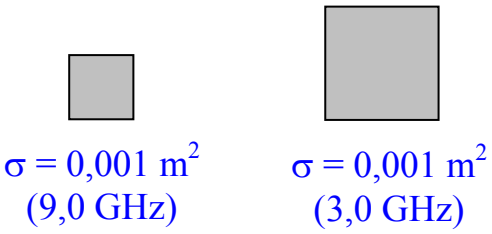

Figura 3. Relação da seção reta radar com a área física para $\sigma = 0{,}001\ m^2$, nas freqüências de 3,0 GHz e 9,0 GHz.

Entretanto, é impossível reduzir a seção reta radar de uma aeronave para níveis de $\sigma = 0{,}001\ m^2$ [3] Aeronaves com seção reta radar reduzida possuem a capacidade de penetrar em espaço aéreo sem serem detectadas por distâncias maiores em relação às aeronaves normais. Para ilustrar o problema de detecção radar, a aeronave americana com características furtivas aos sistemas radares F-117A (Figura 4) pode ser detectada e traqueada a uma distância de 18 km por radares operando entre 3,75 GHz e 10 GHz. O bombardeiro com características furtivas aos sistemas radares B-2 (Figura 4) pode ser detectado e traqueado a uma distância de 12 km voando a 12.000 metros de altitude, e voando a 300 metros de altura é localizado a uma distância de 6 km, utilizando radares operando entre 3,75 e 10 GHz [3]

Foi realizado um vôo de um bombardeiro B-52 (Figura 4) da costa leste até a costa oeste nos Estados Unidos da América, em baixa altitude (300 m) e a aeronave não foi detectada pelos sistemas de vigilância aérea. É importante enfatizar que o bombardeiro B-52 não possui características de baixa detecção, o motivo do bombardeiro não ser detectado foi a baixa altitude de vôo [3].

Uma aeronave com baixo valor de RCS possui capacidade de furtividade de artilharia anti-aérea baseada em mísseis guiados, superioridade aérea em combates aéreos envolvendo mísseis ar-ar, e possibilidade de maior penetração em espaço aéreo vigiado sem ser detectada. Em uma situação de sobrevivência de uma aeronave em missão em espaço aéreo hostil, não importa se radares operando na banda UHF, L, S ou C tenham identificado a presença da aeronave, o mais importante é que a mesma não seja abatida, e isto é normalmente realizado com o traqueamento por radares operando na banda X.

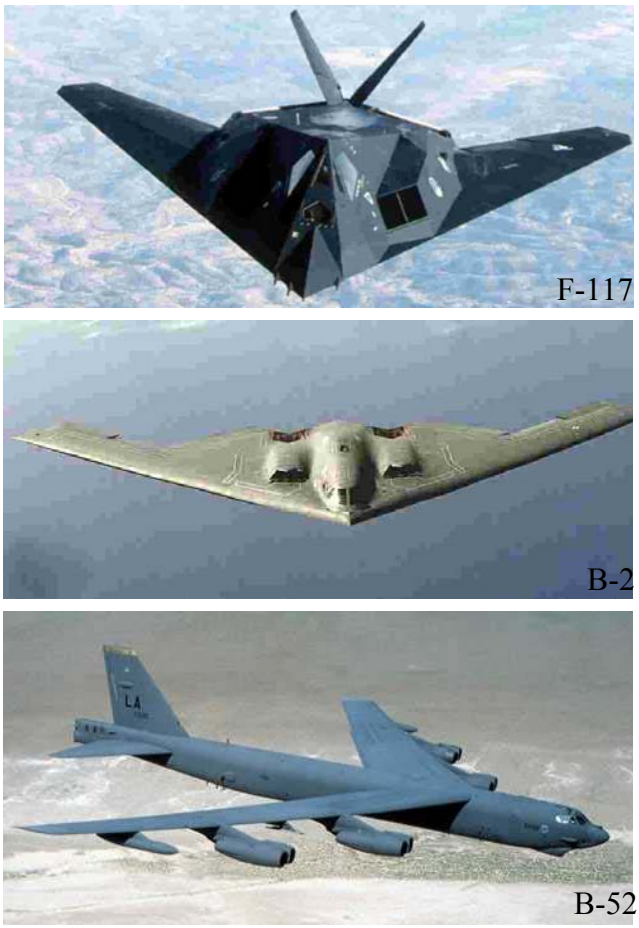

Figura 4. Aeronaves americanas F-117, B-2 e B-52.

CONCLUSÕES

O RCS mínimo detectável para um sistema radar de traqueamento está em torno de $1{,}0\ m^2$. Entretanto, para uma aeronave não ser detectada pelos modernos sistemas radares seu valor de RCS deve estar em $0{,}001\ m^2$, valor impossível de ser atingido para uma aeronave. A redução da assinatura radar de uma aeronave permite obter capacidade de furtividade de artilharia anti-aérea baseada em mísseis guiados, superioridade aérea em combates aéreos envolvendo mísseis ar-ar, e possibilidade de maior penetração em espaço aéreo vigiado (banda S) sem ser detectada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Processo no. 98/15839-4) e ao Comando da Aeronáutica.

REFERÊNCIAS

[1] KNOTT, E. F.; SHAEFFER, J. F.; TULEY, M. T. **Radar cross section, its prediction, measurement and reduction**. Artech House, Inc., 1985.

[2] NOHARA, E. L. **Detecção de plataformas aéreas**. Departamento de Física – Moscow State University. Moscou, Rússia. Estágio técnico realizado durante o doutorado sanduíche, Maio, 2002.

[3] NOHARA, E. L. **Redução da Seção Reta Radar de Plataformas Aéreas**. Fábrica de aeronaves MIG (Mikoyan & Gurevich). Moscou,

Rússia. Estágio técnico realizado durante o doutorado sanduíche, Março, 2002.

[4] NOHARA, E. L. **Caracterização Eletromagnética de Plataformas Aéreas e Terrestres**. Institute of Radioengineering and Electronics – Academy of Sciences. Fryazno, Rússia. Estágio técnico realizado durante o doutorado sanduíche, Fevereiro-Abril, 2002.