

Estudo para a redução da RCS frontal de aeronaves de caça

Leandro Vinícius Coelho¹, Luiz Alberto Andrade² e Mirabel Cerqueira Rezende².

¹Primeiro Esquadrão do Décimo Quarto Grupo de Aviação, Canoas-RS, Brasil

²Instituto de Aeronáutica e Espaço, Divisão de Materiais, São José dos Campos-SP, Brasil

Resumo — Uma típica aeronave de caça possui uma seção reta radar (RCS) na ordem de um metro quadrado. Comparativamente, uma antena plana do tipo array, comumente empregada em radares aeroembarcados, pode chegar a uma RCS de milhares de metros quadrados. Dessa forma, este artigo apresenta um estudo sobre Superfícies Seletivas de Frequência (FSS) e sua aplicabilidade na redução da seção reta radar frontal de aeronaves de caça. Por meio do software de análise eletromagnética *CST Studio Suite™ 2009*, é apresentada uma modelagem de FSS para emprego nos radomes das aeronaves de combate. O emprego de superfícies seletivas surge como um excelente recurso para a redução da RCS frontal, mantendo-se a eficiência do sistema radar embarcado nessas aeronaves.

Palavras-chaves — Seção reta radar, superfície seletiva de frequência, aeronave de caça, simulação.

I. INTRODUÇÃO

Com o surgimento de novas tecnologias no ramo da aviação militar e com o incremento do poder de combate das aeronaves de caça, o cenário da guerra aérea evoluiu rapidamente. Agora, os combates aéreos têm acontecido em distâncias além do alcance visual humano, com notável dependência da capacidade de detecção do sistema radar embarcado nessas aeronaves. Construir uma consciência situacional precisa dentro da sua arena de combate tornou-se a principal necessidade dos pilotos de caça para que seus mísseis de médio alcance BVR (beyond visual range) sejam engajados somente em vetores hostis, a despeito do grande número de aeronaves amigas operando na região de combate.

Nas arenas modernas de combate aéreo, onde a dependência da detecção radar tornou-se essencial, reduzir a seção reta radar frontal de uma aeronave de caça implica aumento da sua capacidade de sobrevivência, além de representar uma vantagem tática durante os engajamentos frente a frente, tão característicos nos cenários BVR.

A principal técnica empregada na redução da RCS de uma aeronave é a aplicação de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) sobre as superfícies refletoras, previamente determinadas por modelagem (simulações computacionais) ou medições de RCS. No caso

de uma aeronave equipada com radar, o radome da mesma não pode ser revestido com MARE, pois este atenuaria o sinal do radar da própria aeronave. Nesse caso, o emprego de superfícies seletivas de frequência surge como um excelente recurso para a redução da RCS, mantendo-se a eficiência do equipamento radar embarcado nessas aeronaves.

II. SEÇÃO RETA RADAR

A. Equação Radar

A detecção de alvos é possível pela propriedade de reflexão das ondas eletromagnéticas, isto é, um feixe de ondas é dirigido para um objeto alvo e a energia refletida por este indicará sua presença. Além de detectar a presença, a maioria dos radares permite obter informações de distância, ângulo relativo e deslocamento do alvo.

A Equação Radar apresenta-se como [1]:

$$R_{m\acute{a}x} = \left[\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{min} L} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (\text{m}) \quad \text{Eq.(1)}$$

Onde, $R_{m\acute{a}x}$ é a distância máxima de detecção, P_t é a potência transmitida, G é o ganho da antena, λ é o comprimento de onda, P_{min} é a potência mínima detectável pelo radar, L representa as perdas e a atenuação atmosférica do sinal e σ é a RCS do alvo.

É importante destacar que, dentre as diversas variáveis da equação radar, a única possível de controle por parte da aeronave alvo é a sua RCS, pois todas as demais são decorrentes do sistema radar que a detecta ou do ambiente. Dessa forma, do ponto de vista da aeronave, os parâmetros do radar e do ambiente podem ser considerados como uma constante C do sistema de detecção. Logo, a Equação 1 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$R_{m\acute{a}x} = [C \cdot \sigma]^{\frac{1}{4}} \quad (\text{m}) \quad \text{Eq.(2)}$$

Analisando a Equação 2, percebe-se que a RCS de um alvo deverá ser diminuída 16 (dezesseis) vezes para que a distância de detecção R caia pela metade.

A Figura 1 ilustra bem a relação entre a RCS de uma aeronave e a sua distância de detecção. O gráfico apresentado foi gerado com resultados obtidos através de medições da distância de detecção de uma determinada aeronave e simulações da RCS da mesma.

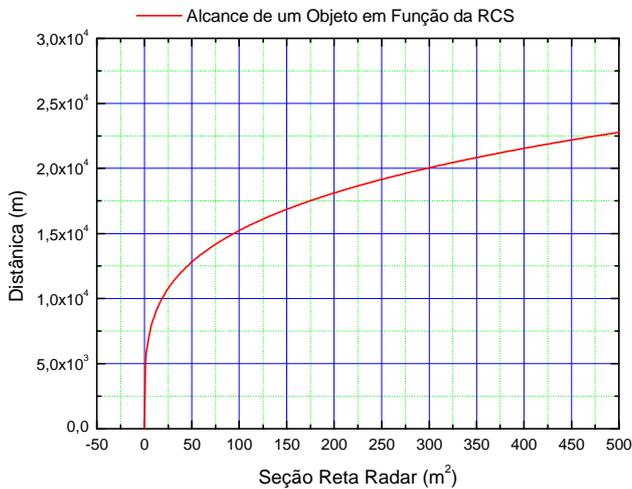


Figura 1 - Distância de detecção em função da RCS.

Analisando a Figura 1, um objeto com RCS de 300 m² seria detectado por um radar fictício a 20 Km. Para que o mesmo alvo seja detectado somente a uma distância de 10Km, sua RCS deveria ser reduzida para um valor aproximado de 20 m².

B. Definição

A seção reta radar (RCS) é a medida da capacidade de um alvo espalhador de refletir sinais de radar na direção do emissor de ondas radar. A RCS é definida como 4π vezes a razão entre a potência de espalhamento em uma direção específica em relação à potência por unidade de área de uma onda plana incidente sobre o espalhador em uma direção quando a distância entre o espalhador e o emissor tende ao infinito. Para um objeto tridimensional, a RCS pode ser expressa em função da densidade de energia incidente W , campo magnético H e campo elétrico E . A RCS em termos da densidade de energia é dada por [2]:

$$\sigma_{3-D} = \lim_{r \rightarrow \infty} \left[4\pi R^2 \frac{|W^s|}{|W^i|} \right] \quad (\text{m}^2) \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde, σ representa a seção reta radar, R é a distância entre o radar e o objeto, W^s e W^i são os valores da densidade de energia espalhada e incidente respectivamente. A Equação 3 é válida quando o alvo é iluminado por uma onda plana, a qual, na prática, é obtida apenas quando o alvo está localizado na condição de campo distante da fonte, isto é, a pelo menos $r = 2D^2/\lambda$, onde D é a maior dimensão do alvo.

A determinação da RCS por meio da Equação 3 é uma solução analítica para objetos de geometria simples. O cálculo

de campos espalhados por um alvo pode ser uma tarefa de difícil tratamento matemático exigindo a solução das Equações de Maxwell sob condições complicadas de contorno.

III. SUPERFÍCIE SELETIVA DE FREQUÊNCIA

Uma típica aeronave de caça possui uma seção reta radar na ordem de um metro quadrado quando observada pelo setor frontal. As aeronaves consideradas *stealth* (invisível) podem possuir uma RCS no mesmo setor de somente 0,01 metro quadrado. Comparativamente, uma antena plana do tipo array, comumente empregada em radares aeroembarcados, pode chegar a uma RCS de milhares de metros quadrados [3].

Como os radomes são transparentes às emissões de RF, medidas para a redução da RCS da antena deverão ser adotadas como: melhoria no casamento de impedância da antena, emprego de material absorvedor de radiação eletromagnética nas bordas da antena, utilização de superfícies seletivas de frequência, entre outras.

A. Definição

Superfícies Seletivas de Frequência são estruturas planares compostas de uma camada metálica sobre um ou mais dielétricos. As FSS possuem arranjos bidimensionais descritos por células que podem conter patches metálicos ou aberturas, ou ainda, uma combinação destes. Quando expostas à radiação eletromagnética, as características periódicas da camada metálica ressoam em determinadas frequências que dependem das propriedades do dielétrico, da geometria e dos espaçamentos utilizados nas células condutoras [4].

Muitos parâmetros de projeto são associados com a estrutura periódica tais como o tipo e a forma do elemento, as dimensões das células unitárias, os tipos de materiais dielétricos e as espessuras dos substratos empregados, os lóbulos de gradeamento, entre outros [5].

B. Características das FSS

As FSS são estruturas periódicas compostas basicamente por um conjunto de elementos idênticos organizados em arranjos bidimensionais infinitos [6].

Um arranjo periódico formado por elementos do tipo patch condutor, chamado de FSS Capacitiva, trabalha como um filtro rejeita-faixa. Quando os elementos da estrutura estão entrando em ressonância, radiam a potência incidente na direção de reflexão, até que na frequência de ressonância, a estrutura se comporta como um condutor perfeito refletindo totalmente a onda incidente.

Por outro lado, um arranjo formado por elementos do tipo abertura, chamado de FSS Indutiva, é usado para fornecer características de um filtro passa-faixa. Na frequência de ressonância, a estrutura apresenta transmissão total da onda incidente.

A Figura 2 ilustra uma FSS capacitiva e outra indutiva projetada com elementos periódicos retangulares do tipo patch condutor e abertura respectivamente. As áreas escuras

representam superfícies metálicas. A figura apresenta ainda os circuitos equivalentes e os gráficos da transmissão (T) versus comprimento de onda (λ) para cada arranjo.

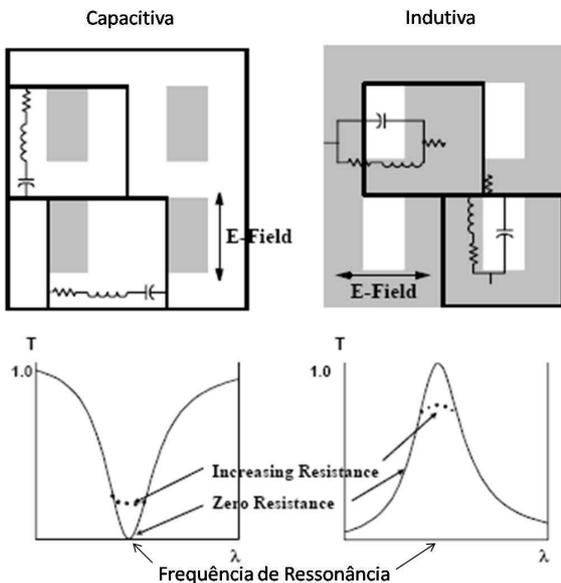


Figura 2 - FSS Capacitiva e Indutiva [7].

Outra característica importante no estudo de FSS diz respeito à Periodicidade. Desde que os elementos do tipo abertura ou patches estejam arranjados de forma periódica, será possível descrever o campo elétrico na estrutura em termos de uma única célula unitária. Pelo Teorema de Floquet, se uma equação diferencial linear possui coeficientes e condições de contorno periódicas, então soluções estáveis geralmente serão funções periódicas no tempo e exponenciais decrescentes [7].

C. Tipos de elementos

Para se obter a resposta desejada de uma FSS é de suma importância determinar o tipo do elemento a ser utilizado. A escolha do elemento deve basear-se preferencialmente naquele o qual a largura de banda na primeira ressonância variar o mínimo possível com a polarização.

Outros fatores importantes no projeto de FSS são as dimensões e a disposição dos elementos na estrutura, pois quando um dipolo é alimentado por uma fonte de RF, e esse dipolo é múltiplo de meio comprimento de onda, ele então reirradia a energia.

Quando vários dipolos estão dispostos em forma de arranjo, a energia reirradiada de todos os elementos será direcionada coerentemente como se uma reflexão estivesse ocorrendo, onde o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência. Isto acontece pois as correntes induzidas em cada dipolo possuem um atraso de fase relativo aos elementos vizinhos. Este atraso de fase faz com que o espalhamento das ondas de todos os elementos seja coerente com a direção de reflexão [5].

Para elementos em forma de espiras quadradas ou circulares, a ressonância ocorre quando o comprimento de

cada meia espira é múltiplo de meio comprimento de onda, ou seja, cada meio comprimento está atuando como um elemento de dipolo.

Finalmente, quando a dimensão do elemento é totalmente diferente das dimensões ressonantes, a onda incidente passará através da superfície seletiva de frequência como se a estrutura fosse transparente, ocorrendo uma pequena perda devido ao dielétrico e à condução do metal.

IV. APLICAÇÃO DE FSS EM AERONAVES DE CAÇA

Considerando uma aeronave de caça com radar instalado na sua seção frontal, utiliza-se a Figura 3 para representar um radome, com o tradicional formato pontiagudo, onde no seu interior está instalada uma antena plana. A superfície do radome foi projetada com uma FSS fina e uma camada de dielétrico, propiciando uma largura de banda praticamente constante com o ângulo de incidência [6].

Esta estrutura, conhecida como Radome Híbrido, possui características de um filtro passa-faixa, sendo utilizada para diminuir a RCS da antena radar quando fora da largura de banda determinada pelo filtro.

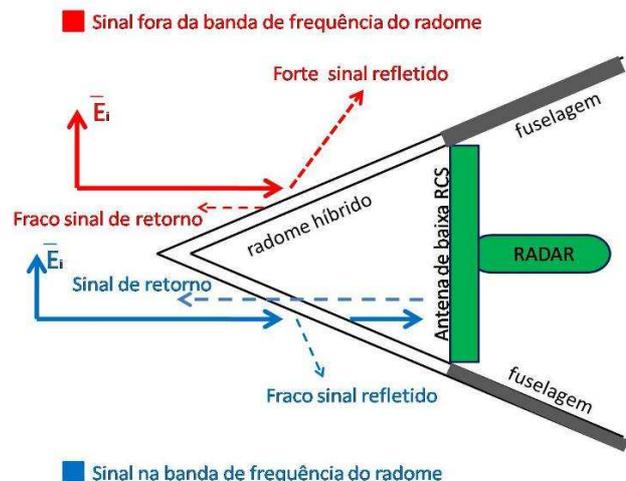


Figura 3 – Radome híbrido [6].

As características de transmissão do radome híbrido estão apresentadas na Figura 4.

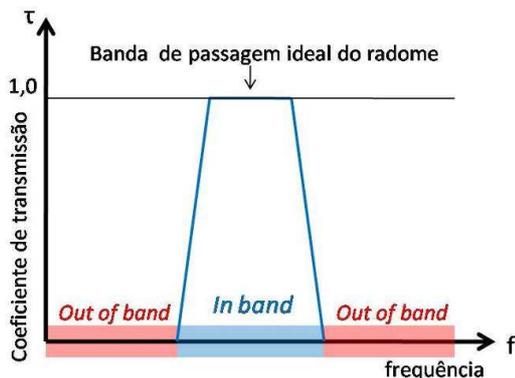


Figura 4 – Características de transmissão do radome [6].

Quando o radome é exposto a uma onda eletromagnética incidente fora da largura de banda apresentada na Figura 4, o sinal será refletido em uma direção biestática, tendo em vista o formato do radome. Dessa forma, apenas uma pequena parcela do sinal será refletida na direção da fonte emissora, representando uma baixa RCS.

Por outro lado, quando o radome é exposto a uma onda incidente na mesma faixa de frequências do filtro, o radome tornar-se-á transparente e ineficiente na redução da RCS frontal da aeronave. Por isso, é extremamente recomendável que as antenas dos radares embarcados sejam projetadas e fabricadas sob o conceito da baixa RCS na faixa de frequências de operação do radar.

Sob o enfoque operacional, os sinais fora da banda (na cor vermelha) representam as emissões provenientes de sensores inimigos. Dessa forma, espera-se baixa potência de retorno na direção do emissor.

Já os sinais em banda (na cor azul) representam as emissões do próprio radar da aeronave. Portanto, nessa faixa de frequências é determinante que a estrutura não apresente perdas que comprometam a eficiência do sistema radar embarcado.

V. MODELAGEM DE UMA SUPERFÍCIE SELETIVA

A simulação computacional é uma ferramenta fundamental na análise do espalhamento eletromagnético em estudos de redução da RCS de plataformas militares tais como: aeronaves, mísseis, foguetes, etc. Recentes desenvolvimentos em algoritmos e métodos teóricos têm criado um grande impacto na previsão e explicação de inúmeros resultados experimentais em espalhamento eletromagnético por superfícies refletoras, dielétricas e magnéticas [1].

Atualmente, existem diversos sistemas computacionais desenvolvidos para essa aplicação. Para fins de elaboração deste artigo, foi utilizado o software *CST Studio Suite™ 2009* produzido pela *Computer Simulation Technology*.

A. Simulações com células unitárias

Devido à natureza periódica da FSS, podem ser utilizados métodos eletromagnéticos numéricos, os quais possibilitam a

expansão do campo elétrico em termos dos modos de Floquet. Essa técnica consiste em fazer uma pré-modelagem do projeto final a partir da modelagem de apenas uma célula unitária.

Nessas simulações, o software CST considera as seguintes condições de contorno: $E = 0$ e $H = 0$. Esse recurso possibilita a otimização do tempo de CPU consumido nas simulações. A Figura 5 ilustra uma célula unitária modelada no CST, onde o elemento ressonante está representado por um anel duplo concêntrico.

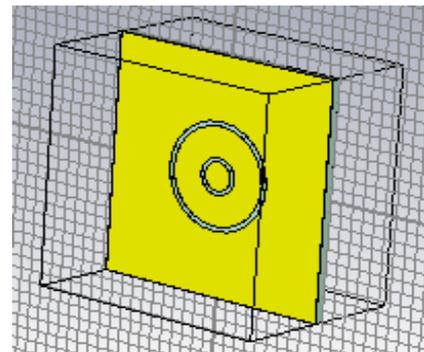


Figura 5 – Célula unitária modelada no software CST.

O resultado dessas simulações é obtido em poucos minutos e já permite ao projetista avaliar o comportamento geral da estrutura periódica. A utilização de simulações com células unitárias permite, ainda, a realização de uma análise do comportamento da FSS com a variação de parâmetros como: tamanho e forma do elemento, tamanho da célula unitária, tipo do dielétrico, espessura do substrato, etc.

A Figura 6 mostra o resultado obtido no software CST com uma simulação na faixa de 0 a 20 GHz da célula unitária apresentada na Figura 5.

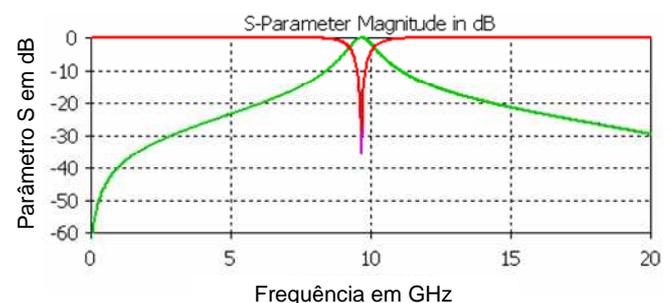


Figura 6 – Simulação com célula unitária.

Onde a curva em vermelho representa o parâmetro S21 (Reflexão) e a curva em verde representa parâmetro S11 (Transmissão).

Analisando a Figura 6, observa-se que a estrutura simulada apresentou transmissão da onda incidente somente em uma largura de banda próxima a 9,5GHz. Para sinais incidentes fora da banda passante, observa-se total reflexão na estrutura.

A Figura 7 mostra o mesmo resultado da simulação anterior

com ênfase na Banda X (8 a 12GHz).

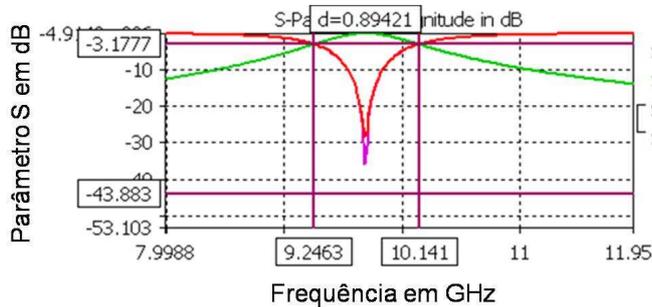


Figura 7 – Simulação com célula unitária – Banda X.

Analisando a Figura 7, observa-se que a estrutura simulada está com uma banda passante, medida a -3dB, de aproximadamente 900 MHz. Portanto, qualquer sinal incidente na frequência de 9,24 a 10,14GHz será transmitido através da FSS projetada.

É importante destacar que a banda passante obtida com a estrutura deverá englobar toda faixa de frequências de operação do radar embarcado na própria aeronave, evitando que suas as emissões sejam refletidas pela FSS.

B. Simulações com estruturas finitas

As simulações realizadas com a estrutura em suas dimensões reais apresentam uma pequena divergência de resultado com aquele obtido com apenas uma de suas células. Isto pode ser explicado pelas condições de contorno assumidas pelo software CST durante a análise eletromagnética.

A Figura 8 mostra uma FSS modelada no CST com as seguintes dimensões: 320 x 480 mm.

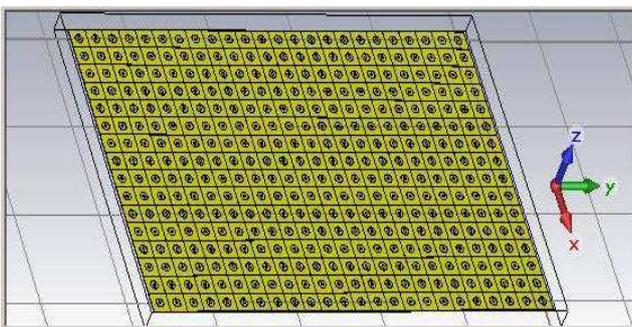


Figura 8 – FSS em tamanho finito modelada no CST.

Para as simulações finitas, são considerados os efeitos da difração nas bordas da estrutura e a não uniformidade do campo elétrico. Dessa forma, essa análise apresenta um resultado mais preciso e com um tempo computacional bastante elevado. Em termos comparativos, uma simulação com célula unitária é realizada em poucos minutos, enquanto

uma simulação finita consome em média 12 a 15 horas de tempo computacional.

Na Figura 9 é apresentado o resultado de uma simulação realizada com a estrutura da Figura 8 na faixa de frequências de 0 a 15 GHz.

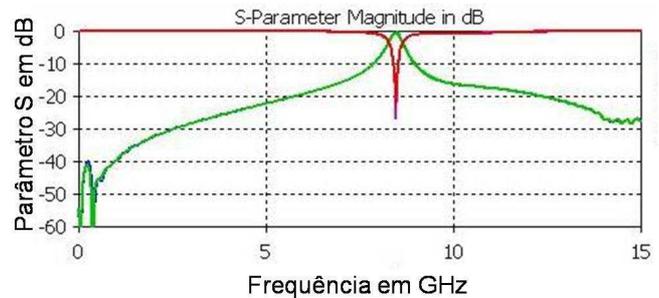


Figura 9 – Simulação com estrutura finita.

Analisando a Figura 9, observa-se que o comportamento de um filtro passa-faixa permanece inalterado. Porém, ocorreu um pequeno deslocamento na faixa de frequências da banda passante da estrutura para valores inferiores aos obtidos na simulação com apenas uma de suas células.

Dessa forma, durante a fase final de projeto da FSS, as simulações deverão ser realizadas com base nas dimensões exatas da estrutura.

VI. CONCLUSÃO

A dependência da capacidade de detecção radar nas arenas de combate aéreo BVR tem motivado estudos na área da redução da RCS frontal dessas aeronaves com objetivo de maximizar as suas chances de sobrevivência e propiciar uma vantagem tática durante os engajamentos.

O emprego de Superfícies Seletivas de Frequências no radome das aeronaves de combate tem se mostrado eficaz na redução da RCS frontal, sem comprometer a eficiência do sistema radar embarcado nessas aeronaves. Para isso, o projeto de FSS deve apresentar uma elevada taxa de transmissão e baixos índices de reflexão na sua banda passante.

A definição das principais características da estrutura seletiva como o tipo e a forma do elemento ressonante e o tipo e a espessura do substrato dielétrico deve atender ao comportamento de um filtro passa-faixa.

O uso de simulação computacional tem se tornado uma ferramenta essencial nas análises eletromagnéticas. Nesse artigo, o software *CST Studio Suite™ 2009* foi utilizado na modelagem de superfícies seletivas, permitindo a realização de simulações com células unitárias e estruturas finitas.

Os resultados obtidos nas simulações com FSS mostraram ser possível a redução de RCS frontal de uma aeronave de caça em uma grande faixa de frequências, mantendo-se a

eficiência do radar embarcado.

Finalizando, com o emprego dessas estruturas seletivas de frequência, as aeronaves de caça estarão capacitadas a operar nas arenas de combate aéreo com maior segurança e operacionalidade.

REFERÊNCIAS

- [1] COELHO, L.V. *Redução da seção reta radar frontal da aeronave F-5M pelo uso de superfície seletiva de frequência*. 2009. 118f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Análise de Ambiente Eletromagnético) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [2] SCHWERZ, J.L. *Proposição de método de medição de seção reta radar de aeronaves*. 2004. 212f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [3] STIMSON, G.W. *Introduction to Airborne radar*. 2nd ed. [S.l.]: ScyTech Pub. 1998. 576p.
- [4] SILVA, P. L. *Modelagem de superfícies seletivas de frequência e antenas de microfita utilizando redes neurais artificiais*. 2006. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. Disponível em: <<ftp://ftp.ppgeec.ufrn.br/Mestrado/M170.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2009.
- [5] WU, T. K. *Frequency selective surface and grid array*. New York: Wiley-Interscience. 1995. 331p.
- [6] MUNK, B.A. *Frequency selective surface: theory and design*. New York: Wiley-Interscience. 2000. 410p.
- [7] REED, J.L. *Frequency selective surface with multiple periodic elements*. 1997. 202f. Thesis (Doctor of Philosophy in Physics) - University of Texas, Dallas.

Leandro Vinícius Coelho é Piloto de Caça da Força Aérea Brasileira e Especialista em Análise de Ambiente Eletromagnético pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil. (e-mail: leandrocoelho@hotmail.com).

Luiz Alberto Andrade é Doutor em Astrofísica pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil. É gerente adjunto do projeto MARE, da Divisão de Materiais do IAE-CTA, São José dos Campos - SP, Brasil. (e-mail: andrade@iae.cta.br).

Mirabel Cerqueira Rezende é Doutora em Química pela Universidade de São Paulo, Brasil. É gerente do projeto MARE, da Divisão de Materiais do IAE-CTA, São José dos Campos - SP, Brasil. (e-mail: mirabel@iae.cta.br).