

Simulador ISAR Conceitual Para Avaliação de Parâmetros de Imageamento

^{1,2}Fabício Nery Fernandes, ³Rafael Lemos Paes e ¹David Fernandes

¹DCTA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50. 12180-900 – S. José dos Campos – SP – Brasil
²1º/7º Grupo de Aviação – Base Aérea de Salvador – Aeroporto Internacional Dois de Julho, 41820-970 – Salvador – BA – Brasil
³DCTA - Instituto de Estudos Avançados – Rodovia dos Tamoios s/n. 12180-900 S. José dos Campos – SP – Brasil

Resumo — Este artigo apresenta uma proposta de um simulador ISAR conceitual para avaliação de parâmetros de imageamento. A teoria envolvida é abordada trazendo conhecimentos já sedimentados em SAR para o ISAR e após é descrito o simulador e apresentados seus resultados.

Palavras-chave — ISAR, SAR, Simulação Computacional.

I. INTRODUÇÃO

O crescimento do Brasil no cenário político mundial trouxe consigo a necessidade de melhorias na proteção das riquezas internas do país. Com essa finalidade foi adquirida a nova aeronave de patrulha da FAB, o P-3 AM, que inclui em seus novos equipamentos o modo de identificação a distância com radares de abertura sintética inversa (ISAR), equipamento ainda não operado sistematicamente pela FAB, o que pode acarretar uma subutilização do mesmo. O uso do ISAR como sistema imageador além de possibilitar a observação remota a grandes distâncias também pode operar em condições meteorológicas pouco favoráveis aos sistemas ópticos.

Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar um simulador ISAR conceitual para avaliação de parâmetros de imageamento, que em muitos casos podem ser arbitrados pelo operador do radar em função da geometria de observação do alvo e do tipo de resultado que ele espera obter da observação da imagem do alvo formado pelo ISAR.

O simulador conceitual gera, de modo simplificado, imagens de alvos formados por conjuntos de refletores pontuais dominantes presentes em alvos complexos, tais como as estruturas de navios. Essa geração de imagens é realizada modelando-se e simulando-se os dados brutos do radar, em função dos parâmetros característicos do radar, do alvo, do seu movimento e da geometria de observação. A simplificação realizada foi desconsiderar o efeito da migração de célula de resolução [1] o que facilita a implementação do processo de formação de imagens. Apesar desta simplificação os efeitos na imagem das alterações dos parâmetros do radar do alvo e da observação podem ainda ser realisticamente avaliados.

Apresenta-se ainda neste trabalho o desenvolvimento matemático e a definição dos sinais e parâmetros do ISAR de um modo analítico e fundamentado no processo de formação de imagens do SAR imageador de cenas extensas [1]. Na Seção II são apresentados os conceitos de formação de imagem SAR de alvos extensos, [1, 2], e na Seção III, estes conceitos são aplicados a geometria de observação do ISAR

[3, 4]. Na seção IV é apresentada a estrutura do simulador e na Seção V são apresentados resultados de uma simulação em um cenário simplificado, motivado pela necessidade real de se imagear, para reconhecimento, alvos marítimos, que pelo movimento do mar são passíveis de serem imageados pelo ISAR. Na Seção VI são apresentados os comentários finais a respeito do trabalho realizado.

II. SAR NO MODO IMAGEADOR DE GRANDES ÁREAS

Para radares de abertura real (sem abertura sintética) a resolução azimutal é função da distância do alvo e da abertura angular azimutal θ_a do feixe da antena, assim, para se obter uma boa resolução em radares embarcados de abertura real, é necessária uma antena de pequena abertura angular, ou seja, de grande comprimento efetivo $l_a = \lambda/\theta_a$, [1], fato este que pode impossibilitar a sua utilização em plataformas aéreas ou orbitais. No Radar de Abertura Sintética (SAR) pode-se sintetizar uma antena de grande comprimento efetivo, $L \gg l_a$, utilizando-se apenas uma única antena de pequeno comprimento efetivo l_a , obtendo-se assim uma grande resolução azimutal [1, 2, 5].

Para geração de uma imagem bidimensional, além do processamento azimutal (direção de voo da plataforma), é necessário o processamento do sinal em alcance (direção de propagação da onda eletromagnética transmitida).

Na saída do receptor síncrono fase-quadratura do radar, acontece a primeira etapa do processamento SAR, onde a envoltória complexa do sinal eco, para se obter uma boa resolução em alcance, passa por um filtro casado com o *chirp* transmitido (sinal modulado linearmente em frequência), o qual realizará a compressão de pulso. A saída do filtro casado é dada por [1, 2]

$$z(t_r) = K_I \exp(-j\pi\gamma(t_r - \tau)^2) \text{sinc}(\gamma(t_r - \tau)T_p) \quad (1)$$

onde, K_I é uma constante relativa a refletividade do alvo, atenuações no meio, diagramas das antenas receptora e transmissora e os ganhos do receptor radar, T_p é o tempo de duração do *chirp* transmitido, γ é a variação de frequência intrapulso por unidade de tempo (*chirp rate*), τ é o atraso do pulso e $\text{sinc}(x) = \text{sen}(\pi x)/(\pi x)$.

De (1) define-se a resolução em alcance como sendo a separação entre dois primeiros nulos da função $\text{sinc}(\cdot)$, ou seja,

Fabício Nery Fernandes (email: fabriciofes@hotmail.com), Rafael Lemos Paes (email: rlpaes@cta.ieav.br), David Fernandes (email: david@ita.br).

$$\delta_r = \frac{c}{2\gamma T_p} \quad (2)$$

onde c é a velocidade de propagação da luz no vácuo.

Na segunda etapa do processamento SAR é obtida a resolução azimutal, através da síntese de uma antena muito longa (de grande resolução). Consideremos uma plataforma, com um sistema radar embarcado, movendo-se com movimento retilíneo e uniforme, com velocidade constante v_a e iluminando um dado alvo pontual, conforme mostrado na Fig. 1.

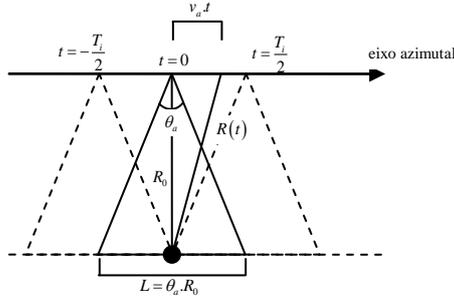


Fig. 1. Geometria básica de iluminação SAR.

onde $R(t)$ é a distância do alvo pontual até o radar no instante t , R_0 é a distância do alvo pontual em $t = 0$, v_a é a velocidade da plataforma, θ_a é a abertura azimutal da antena do radar e T_i é o tempo de iluminação do alvo

$$T_i = \frac{L}{v_a} = \frac{R_0 \theta_a}{v_a} \quad (3)$$

A fase ($\psi(x)$) do sinal eco relativa ao deslocamento azimutal fica

$$\begin{aligned} \psi(t) &= \frac{4\pi}{\lambda} R(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{R_0^2 + (v_a t)^2} \\ &\cong \frac{4\pi}{\lambda} \left(R_0 + \frac{(v_a t)^2}{2R_0} \right) = \frac{4\pi}{\lambda} R_0 + \pi \gamma_a t^2 \end{aligned} \quad (4)$$

onde λ é o comprimento de onda da portadora do sinal e γ_a é a variação de frequência azimutal durante a iluminação do alvo

$$\gamma_a = \frac{2v_a^2}{\lambda R_0} \quad (5)$$

O sinal eco azimutal pode então ser representado por:

$$y_a(t) = \text{rect} \left[\frac{t - \tau_a}{T_i} \right] \exp(-j\psi(t - \tau_a)) \quad (6)$$

onde τ_a é relativo a posição azimutal do alvo e, se o alvo está no través da plataforma para $t = 0$, como mostrado na Fig. 1, então $\tau_a = 0$.

Analogamente ao realizado em alcance, não se considerando os efeitos da migração da célula de resolução [3], para se obter uma boa resolução na direção azimutal, faz-se a compressão azimutal do sinal (5) através de um filtro casado com $\exp(-j\psi(t - \tau_a))$. Assim, o sinal na saída do filtro casado tem a forma

$$z_a(t) = K_2 \exp(-j\pi\gamma_a(t - \tau_a)^2) \text{sinc}(\gamma_a(t - \tau_a)T_i) \quad (7)$$

onde K_2 é uma constante.

De (7) determina-se a resolução azimutal

$$\delta_a = \frac{v_a}{\gamma_a T_i} \quad (8)$$

onde $\gamma_a T_i = B_a$ é a banda espectral azimutal do sinal eco na dimensão azimutal da imagem SAR. Assim, a banda azimutal (B_a) fica

$$B_a = \frac{2\theta_a \cdot v_a}{\lambda} \quad (9)$$

Substituindo (9) em (8) têm-se

$$\delta_a = \frac{\lambda}{2\theta_a} \quad (10)$$

III. MODO DE IMAGEAMENTO ISAR

Na formação da imagem bidimensional os radares de abertura sintética inversa (ISAR) também utilizam compressão de pulso para se obter uma alta resolução em alcance, quanto a resolução angular a diferença básica entre o ISAR e o SAR imageador descrito na Seção II é que no ISAR a imagem é formada devido ao movimento relativo de rotação do alvo em relação ao radar. A Fig. 2 mostra a geometria básica do ISAR, onde um alvo pontual gira com velocidade angular ω com centro de rotação em C . Nesta Figura apresenta-se o alvo pontual (circulo preto) em duas posições.

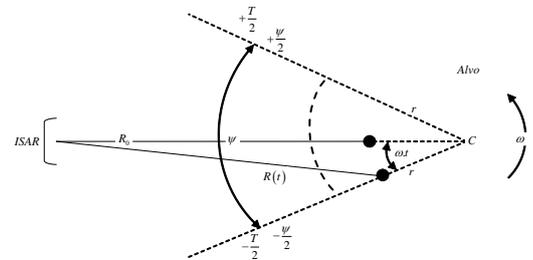


Fig. 2. Geometria básica de iluminação ISAR.

Na Fig. 2 R_0 é a distância do radar ao elemento espalhador do alvo no instante $t = 0$, r é a distância do elemento espalhador ao centro de rotação do alvo, ω é a velocidade de rotação do alvo, ψ é o ângulo de observação do radar, que corresponde a um tempo de T , chamado de tempo de iluminação e $R(t)$ é a distância do radar para o elemento espalhador no instante t .

Da Fig. 2 tem-se, pela lei dos cossenos, que

$$\begin{aligned}
 R(t) &= (R_0 + r) + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{R_0 + r}\right)^2 - \frac{2r}{R_0 + r} \cos(\omega t)} \\
 &\cong_{R_0 \gg r} (R_0 + r) + \left(1 - \frac{r \cos(\omega t)}{R_0 + r}\right) \\
 &= R_0 + 2r \sin^2\left(\frac{\omega t}{2}\right) \\
 &\cong_{\omega t / 2 \text{ pequeno}} R_0 + \frac{r\omega^2 t^2}{2}
 \end{aligned} \tag{11}$$

A fase do sinal eco de retorno do elemento espalhador do alvo no instante t fica

$$\begin{aligned}
 \psi(t) &= \frac{4\pi}{\lambda} R(t) \cong \frac{4\pi}{\lambda} \left(R_0 + \frac{r\omega^2 t^2}{2}\right) \\
 &= \frac{4\pi}{\lambda} R_0 + \pi\gamma_c t^2
 \end{aligned} \tag{12}$$

onde γ_c é a variação da frequência por unidade de tempo na modulação em frequência dada pelo movimento de rotação do alvo

$$\gamma_c = \frac{2\omega^2 r}{\lambda} \tag{13}$$

Analogamente ao realizado na Seção II, o processamento angular é realizado através da compressão do eco de duração T e variação linear de frequência γ_c . No caso do ISAR será considerado um tempo de integração $T_i \leq T$, definido pelo filtro compressor, de modo que a resolução do sinal após a compressão possa ser controlada por este valor.

$$T_i = \frac{\psi_i}{\omega} \tag{14}$$

onde ψ_i é o ângulo de integração ($\psi_i \leq \psi$) correspondente ao tempo de integração T_i .

Considerando o sinal eco $y_c(t)$ de um alvo pontual na posição angular inicial correspondente a τ_c representado por

$$y_c(t) = \text{rect}\left[\frac{t - \tau_c}{T}\right] \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} R(t - \tau_c)\right) \tag{15}$$

a saída $z_c(t)$ do filtro casado é dada por

$$z_c(t) = K_3 \exp\left(-j\pi\gamma_c (t - \tau_c)^2\right) \text{sinc}\left(\gamma_c (t - \tau_c) T_i\right) \tag{16}$$

onde K_3 é uma constante.

De (15) tem-se que a resolução angular será dada por

$$\delta_c = \frac{\omega r}{\gamma_c T_i} = \frac{\omega r}{B_c} = \frac{\lambda}{2\psi_i} \tag{17}$$

onde B_c é a banda espectral angular definida por

$$B_c = \gamma_c T_i = \frac{2\omega r \psi_i}{\lambda} \tag{18}$$

onde ψ_i é o ângulo de integração ($\psi_i \leq \psi$) correspondente ao tempo de integração T_i .

Observa-se que a banda angular B_c não depende somente do operador do radar escolher o tempo de integração. Esta banda varia também com a velocidade de rotação do alvo que, no caso de imageamentos de alvos marítimos, é dada pelo balanço do mar.

Convém ressaltar ainda que B_c é a banda espectral após a compressão de pulso, definida arbitrariamente pelo tempo de integração T_i ou pelo ângulo de integração ψ_i , mas o sinal eco na entrada do filtro casado tem a sua banda B_{ac} definida pelo tempo de observação T ou pelo ângulo de observação ψ .

$$B_{ac} = \gamma_c T = \frac{2\omega r \psi}{\lambda} \geq B_c \tag{19}$$

A imagem bidimensional gerada pelo ISAR tem um de seus eixos definido pela direção do vetor visada \vec{R}_{visada} , que é a reta que une a antena do ISAR ao centro de rotação do alvo. Para definir-se o outro eixo da imagem devemos considerar o vetor velocidade angular total do alvo $\vec{\omega}_{real}$ descrito por

$$\vec{\omega}_{real} = \vec{\omega}_{visada} + \vec{\omega}_{normal} \tag{20}$$

onde $\vec{\omega}_{visada}$ é a componente na direção da linha de visada e $\vec{\omega}_{normal}$ é a componente normal a linha de visada.

Somente a componente $\vec{\omega}_{normal}$ pode causar desvio Doppler no sinal eco, pois a velocidade linear a ela associada, que é normal a $\vec{\omega}_{normal}$, pode ter componente na direção da linha de visada. Deste modo além de \vec{R}_{visada} o outro eixo que define a imagem ISAR é dado por $\vec{R}_{visada} \times \vec{\omega}_{normal}$ [3]. A Fig. 3 mostra o plano de projeção correspondente a imagem ISAR.

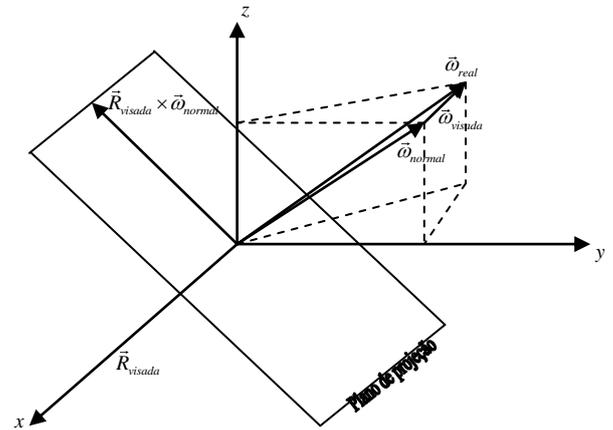


Fig. 3: Plano de projeção ISAR [3].

IV. ESTRUTURA DO SIMULADOR

O simulador ISAR conceitual gera, de modo simplificado, a imagem ISAR de um alvo descrito por um conjunto de refletores pontuais. A simplificação considerada foi a de não levar em conta a migração da célula de resolução que faz com que o sinal eco bidimensional não possa ser representado por funções separáveis, uma para a direção em alcance e outra para a direção angular (azimutal ou de elevação).

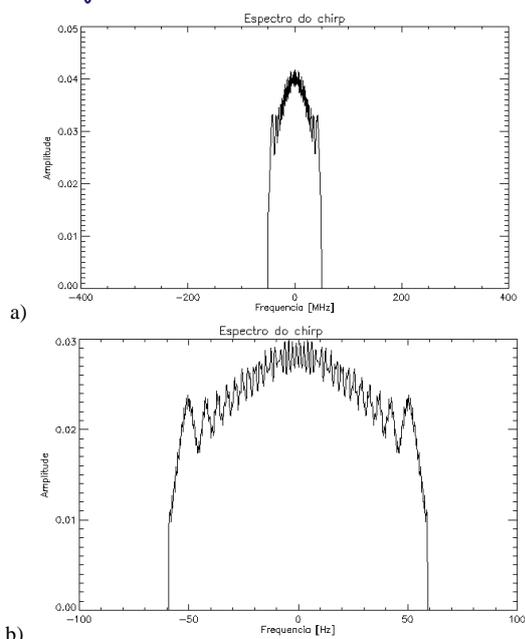


Fig. 7. Espectros: a) *Chirp* em alcance e b) *Chirp* em elevação.

Na Fig. 8 tem-se os dados brutos que serão comprimidos pelo processador ISAR e a imagem ISAR que reconstrói a imagem do alvo observado.

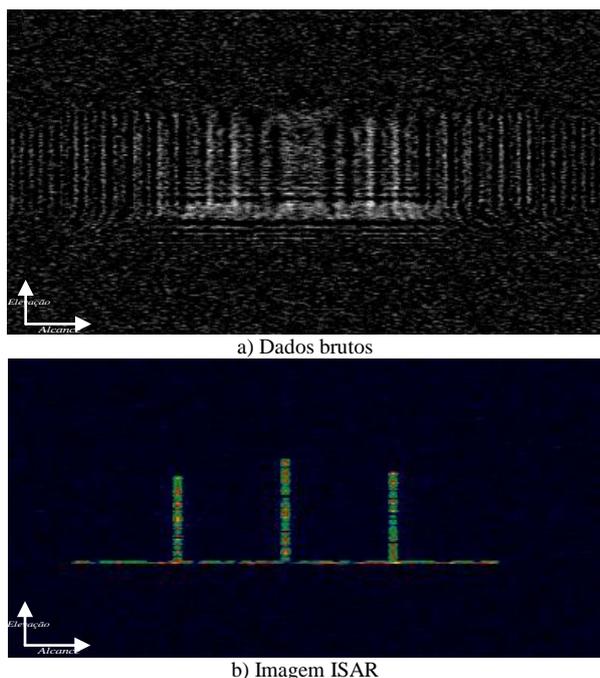


Fig. 8. Imagem dos dados brutos e do alvo.

Na imagem ISAR na Fig. 8b, pode-se observar os refletores pontuais dominantes, com diferentes intensidades, formando a estrutura do alvo que está sendo observado.

A diminuição do tempo de integração leva a uma diminuição na banda angular amostrada pelo radar, sendo esta insuficiente para amostragem total do alvo em questão, se mantida a mesma velocidade angular, ocasionando a ambiguidade na dimensão elevação conforme pode ser observado na Fig. 9.

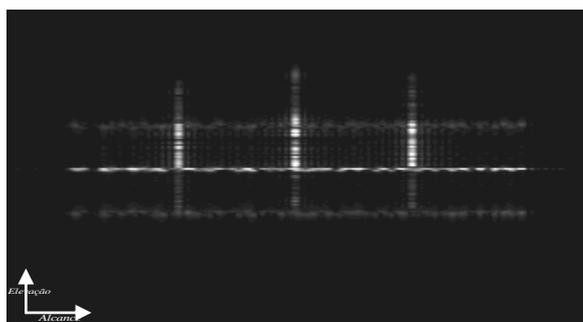


Fig 9. Imagem ISAR com ambiguidade devido ângulo de integração menor que o necessário

Na Fig. 9 pode-se observar as imagens duplicadas na dimensão elevação, pois o ângulo de integração escolhido foi a metade do escolhido para realização da imagem da Figura 8, sendo que o alvo continua com a mesma velocidade angular, gerando assim a ambiguidade observada.

VI. COMENTÁRIOS FINAIS

O simulador conceitual para avaliação de parâmetros de imageamento proposto é uma primeira versão de um processo de simulação que poderá contribuir diretamente para treinamento das equipagens que futuramente irão compor as tripulações da aeronave P-3 AM.

Com este tipo de simulador pode-se:

- Treinar diferentes tipos de visualizações não usuais, já que o plano de projeção da imagem irá variar de acordo com a movimentação dos alvos
- Ambientar os operadores para entendimento do processo de formação da imagem ISAR e os parâmetros que norteiam a formação da imagem para uma plena utilização do equipamento.

Com uma versão mais aprimorada do simulador, incorporando, por exemplo, a compensação de movimento dos desvios indesejados da plataforma e a estimativa de movimentos do alvo [1, 6]:

- Ser referência para avaliações operacionais podendo realizar simulações antes da realização dos vôos.
- Ser referência para futuras especificações técnicas na compra de novos equipamentos.

REFERÊNCIAS

- [1] CURLANDER, J. C., MCDONOUGH, R. N. Synthetic Aperture Radar: System and Signal Processing, New York: Wiley, 1991.
- [2] SKOLNIK, M.I. Introduction to Radar Systems, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [3] WEHNER, D.R. High-Resolution Radar, 2nd ed. New York: Artech House, 1994.
- [4] FERNANDES, F. N. “Análise do processo de formação de imagens para radares de abertura sintética inversa (ISAR).” 2010. 71f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Lato Sensu) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [5] Mensa, D.L. High Resolution Radar Cross-Section Imaging, Boston, MA: Artech House, 1991.
- [6] CHOI, I.S., CHO, B.L., KIM, H.T – “ISAR motion compensation using evolutionary adaptive wavelet transform”, IEEE Proceedings - Radar Sonar Navigation, vol 150, No 4, p. 229-233, August 2003