

## PROCESSAMENTO ADAPTATIVO EM ESPAÇO-TEMPO PARA SISTEMAS SAR COM MÚLTIPLOS CANAIS

Ishai Freitas Elarrat<sup>1,2</sup>  
Nicolas Gebert<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA/CTA  
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 - 12228-900 - São José dos Campos - SP, Brasil  
ishai.elektronik@gmail.com

<sup>2</sup>German Aerospace Center (DLR), Microwaves and Radar Institute  
82234 Wessling, Germany  
nico.gebert@dlr.de

**Abstract.** Radar systems with several receiving channels enable to overcome restrictions in synthetic aperture radar (SAR) remote sensing conventional approaches. High Resolution Wide Swath SAR imaging is possible through the combination of Multi-aperture SAR systems and appropriate coherent processing of the individual aperture signals. Signal detection using an array of sensors has offered significant benefits in several applications: radar, sonar, satellite communications and seismic systems. The use of more than one receiver overcomes the directivity and bandwidth limitations of a single sensor. Improvement in the Signal-to-Noise-Ratio (SNR) can be achieved due to the additional gain afforded by an array of sensors, resulting in an ability to place deep nulls in the direction of interfering signals. The present paper turns focus to an algorithm of reconstruction of the SAR signal based on the classical approach Space-Time Adaptive Processing (STAP), taking into account the influence of the digital processing network on performance parameters, such as SNR and azimuth ambiguity-to-signal-ratio.

**Palavras-chave:** *beamforming* digital, High Resolution Wide Swath, radar de abertura sintética, STAP.

### 1. Introdução

Radares de Abertura Sintética (SAR) constituem um amplo conjunto de sistemas de sensoriamento remoto bem estabelecido para imageamento terrestre. É um sensor de visada lateral embarcado em uma plataforma móvel que na direção do seu movimento forma uma rede de antenas cujo comprimento efetivo, também chamado de comprimento da abertura sintética,  $L_{sa}$ , é determinado pelo tempo de iluminação de um alvo pontual durante a passagem do radar. Essa abertura sintética varia com a distância do alvo ao radare é o parâmetro que define a resolução da imagem da direção do deslocamento do sensor.

A imagem produzida por um sistema SAR consiste de duas dimensões. Uma é chamada de *range* e é uma medida da distância em "linha de visada" do radar ao alvo. A outra dimensão denominada azimuth corresponde a direção do movimento do sensor e idealmente é perpendicular ao *range*. A capacidade especial de sistemas SAR é de produzir resolução geométrica relativamente fina em azimuth. Para atingir este objetivo, uma antena fisicamente grande é necessária para focar a energia de transmissão e recepção em um feixe estreito. A antena sintetizada permite, portanto, esse melhoramento na qualidade da imagem. Tanto melhor será a resolução  $\delta_{az}$  em azimuth quanto maior for a abertura sintética  $L_{az}$ , que por sua vez define e é proporcional a banda do sinal recebido nesta direção, denominada banda Doppler ( $B_{az}$ ). A relação entre estas grandezas é dada por

$$\delta_{az} \approx 0.89 \cdot \frac{v_g}{B_{az}} \quad (1)$$

$$B_{az} = \frac{2v_g L_{sa}}{\lambda R} = \frac{2v_g}{l_a} \quad (2)$$

onde  $v_g$  corresponde à velocidade do sensor projetada no plano da cena, ou seja, no solo,  $\lambda$  é o comprimento de onda da portadora do sinal transmitido e  $R$  é a distância do alvo ao radar e  $l_a$  é o comprimento efetivo da antena real do sensor SAR que ao ocupar sucessivas posições durante o movimento do sensor forma a rede de comprimento efetivo  $L_{sa}$ .

A Figura 1 ilustra a geometria básica de um sistema SAR, com um sensor movimentando-se a uma altura  $h_s$  e com velocidade  $v_s$ . A área continuamente imageada é denominada swath e  $W_g$  indica a largura em *range* desta região.  $R_0$  é a distância do radar ao centro da cena.

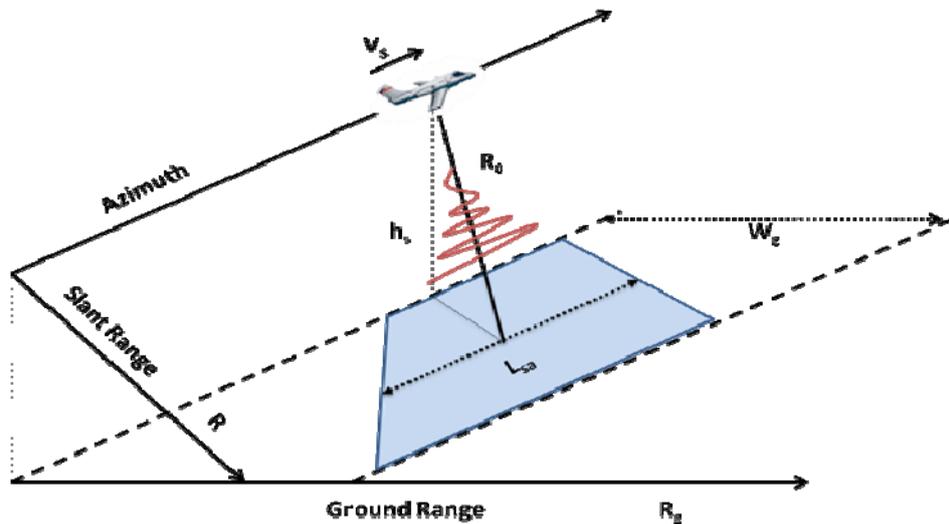


Figura 1: Geometria de um sistema de radar de abertura sintética (Elarrat, 2010).

É interessante notar que para alcançar a resolução desejada, a missão SAR deve não apenas possuir uma antena sintetizada suficientemente grande, mas deve também levar em consideração os elementos da teoria de discretização de sinais. A frequência de repetição de pulsos (PRF – Pulse Repetition Frequency) corresponde à taxa de amostragem utilizada para amostrar o sinal em azimute e deve obedecer ao teorema de amostragem de Nyquist-Shannon, ou seja, para sinais banda base complexos, que é o caso dos sinais SAR deve-se ter:  $PRF \geq B_{az}$ . Se um valor muito baixo de PRF for utilizado (caracterizando a subamostragem), alvos ambíguos podem ocorrer na imagem SAR final.

Portanto supressão de ambiguidade e resolução impõem um limite inferior ao valor da PRF. Quanto maior esta frequência, ambiguidades menores poderão ocorrer e uma melhor qualidade da imagem em azimute pode ser alcançada.

A PRF também regula a faixa, em *range*, da cena que pode ser imageada sem ambigüidades, ou seja, sem a superposição de sinais “ecos” provenientes de áreas distintas. Para evitar estas possíveis ambigüidades, a PRF deve ser adaptada para a faixa, em *range*, de interesse, uma vez que alta PRF implica em retornos ambíguos próximos resultando em um *swath* imageado menor. Em consequência, quanto maior PRF, melhor a resolução, mas em compensação menor torna-se a largura  $W_g$  imageada. Portanto os parâmetros de um sistema

SAR estão sujeitos a um compromisso contraditório. Uma boa resolução em azimute requer um tempo de iluminação longo, de forma a sintetizar uma grande abertura sintética da antena. Isto implica em uma grande largura de banda Doppler. Portanto é necessária uma elevada taxa de amostragem PRF, de forma a estar de acordo com o critério de amostragem de Nyquist. Por outro lado, um valor baixo de PRF seria favorável à obtenção de uma maior faixa no solo imageada sem ambiguidades em *range*.

De forma a superar esta limitação surgiu o conceito de Multi-Channel SAR, que combina um único transmissor com múltiplos canais de recepção. Esta combinação faz com que seja possível resolver o problema de atingir melhor resolução para imagens com elevada largura mapeada, caracterizando o conceito de imageamento SAR HRWS (High Resolution Wide Swath).

## 2. SAR com múltiplos canais

Se um único transmissor ilumina uma larga região e  $N$  pequenas antenas, associadas a receptores, alinhadas na direção de voo possibilitam a gravação simultânea do sinal eco de retorno correspondente a cena observada a PRF efetiva torna-se  $N$  vezes maior que a PRF fisicamente em uso.

A Figura 3 ilustra a ideia básica de um sistema de múltiplos canais. O bloco *Digital Beamforming* corresponde ao processamento digital adicional que combina os sinais provenientes das subaberturas. Finalmente uma única saída é obtida, a qual reúne informações das diferentes entradas.

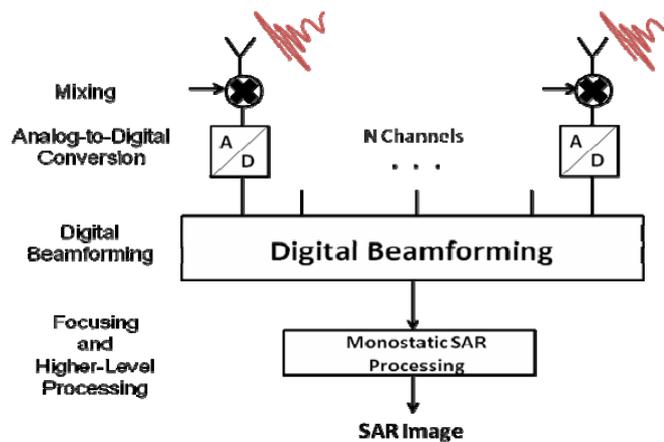


Figura 3: Diagrama de blocos para processamento em sistema de múltiplos canais SAR (Elarrat, 2010).

A vantagem de utilizar um conjunto de receptores reside precisamente na mudança da PRF efetiva que pode ser alcançada. Cada canal recebe sinais que estão amostrados à taxa PRF, porém após o devido processamento no estágio de beamforming digital, um sinal amostrado com taxa  $N$  vezes maior é obtido.

Em termos de sinal adquirido em azimute, observa-se que a PRF mínima necessária para obedecer ao critério de Nyquist decresce em um fator de  $N$ , ou seja, tem-se com esta geometria que:

$$PRF \cdot N \geq B_{az} \quad (3)$$

Para cada pulso transmitido,  $N$  sinais são recebidos em posições diferentes no eixo de azimute que dependem do espaçamento físico entre as aberturas (antenas) receptoras.

A amostragem espacial, ou espaçamento entre pixels na direção azimutal, é controlada pelos parâmetros de velocidade e pela PRF, sendo dado por:  $v_s/PRF$ . Essa é a distância em *along track*, ou azimute, que o sistema percorre entre a transmissão de dois pulsos consecutivos.

Um importante conceito neste contexto é a *Amostragem Uniforme*, que considera que todas as amostras coletadas estão uniformemente distribuídas ao longo da abertura sintética. Neste cenário a distância elétrica efetiva entre duas antenas adjacentes, considerando-se uma antena transmissora e N antenas receptoras, é dada por.

$$\Delta x = \frac{2v_s}{PRF \cdot N} \tag{4}$$

Note que apesar do espaçamento elétrico entre duas antenas consecutivas ser  $\Delta x$  o espaçamento físico entre elas é  $\Delta x/2$ . Considerando um sistema em que  $l_{az} = N \Delta x$  é o comprimento elétrico total do conjunto das N aberturas em azimute, a PRF ótima, isto é, aquela em que o sistema passa a operar com amostras uniformemente distribuídas, é dada por

$$PRF_{uni} = \frac{2v_s}{\Delta x \cdot N} = \frac{2v_s}{l_{az}} \tag{5}$$

A Figura 4 ilustra a operação sob as condições de PRF uniforme para N = 5.

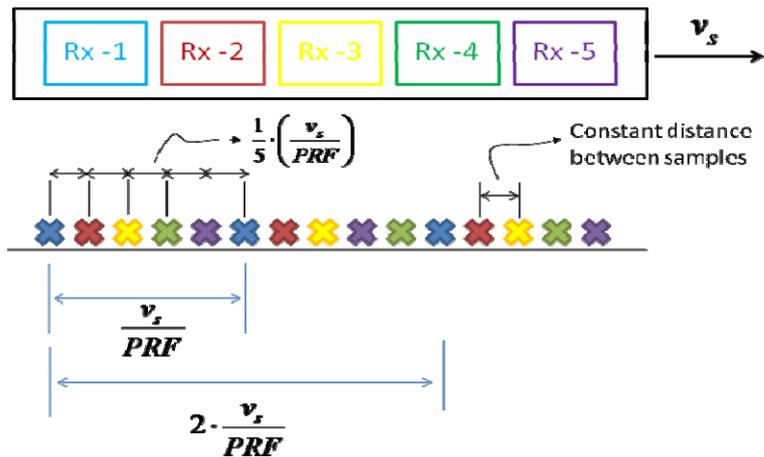


Figura 4: Operação com amostragem Uniforme para N = 5 (Elarrat, 2010).

O cenário com amostragem uniforme é um caso ótimo, pois fornece um conjunto de dados equivalente ao de um sistema de uma única abertura receptora operando com  $PRF \cdot N$ , o que significa que métodos convencionais de processamento de sinais SAR podem ser aplicados para reconstruir os dados do sistema com múltiplos canais. Em compensação, qualquer desvio na PRF ótima implica em amostragem não-uniforme e os algoritmos convencionais provocam a degradação no desempenho do processo de formação da imagem final. Dentre os algoritmos desenvolvidos para recuperar a imagem final a partir de N entradas, compondo o *beamforming* digital, destaca-se o algoritmo denominado *Reconstruction Filtering*, inicialmente proposto em (Gebert, 2009). Baseado na generalização do teorema de Nyquist, o qual garante que o espectro de um sinal pode ser recuperado sem abiguidades se o teorema da amostragem for obedecido na média, sem necessariamente impor uma amostragem especial uniforme. Esta técnica envolve a aplicação de um conjunto de filtros lineares de forma a reconstruir o espectro com *aliasing* adquirido em azimute, resolvendo efetivamente esta limitação dos sistemas SAR com diversos receptores.

O presente estudo tem por objetivo a proposta de um *beamformer* digital que se destina a recuperar o sinal em azimute, suprimindo as ambiguidades, e ao mesmo tempo fornecer uma imagem SAR sem degradação no *Signal-to-Noise-Ratio* (SNR) final. Isto é possível através de uma abordagem similar ao método clássico conhecido como *Space-Time Adaptive Processing* (STAP). Isto é feito considerando as ambiguidades azimutais como ruído colorido e adaptando o processamento para minimizar a potência combinada do ruído branco e ruído colorido, através de uma relação de compromisso entre filtragem espacial do sinal em azimute, para suprimir ambiguidades (*Reconstruction Filtering*), e filtro casado (*Matched Filtering*) para otimizar o SNR, no que se refere à componente de ruído branco.

As ambiguidades em azimute são suprimidas pelo ajuste adaptativo dos coeficientes de filtragem, posicionando-se os nulos nos ângulos correspondentes às frequências Doppler ambíguas. Esta abordagem de supressão de ambiguidade é, então, combinada com o filtro casado, fornecendo basicamente o chamado *Minimum Variance Distortionless Beamformer*.

Em comparação a um simples filtro de supressão de ambiguidades, como o filtro de reconstrução, este método combinado permite uma melhora no SNR a custo de uma degradação nesta supressão, que pode ser considerada aceitável desde que as ambiguidades se mantenham dentro do nível de ruído. É preciso realizar a correta estimação da razão entre a potência de ruído branco e a potência de ambiguidade, fazendo com que o método não seja independente dos dados de entrada.

### 3. Método Proposto

O algoritmo implementado para reconstrução da imagem SAR com alta resolução em azimute e larga faixa imageada consiste em associar o método STAP, que permite suprimir a influência de sinais indesejados como *jammers* na detecção de um alvo, com a ideia de posicionar nulos nas frequências ambíguas no eixo Doppler. Portanto deve-se encontrar uma relação entre a interpretação em termos de potência para o ruído colorido (correspondente a *jammers* em uma abordagem clássica) e a potência associada às ambiguidades em azimute.

Para gerar o filtro adequado, deve-se conhecer a matriz de covariâncias associada às parcelas de ruído branco e ruído colorido, sendo esta última a componente correspondente à presença de *jammers*. A matriz de covariância  $R$  será então representada por.

$$R = \sigma_j^2 \cdot R_s + \sigma_n^2 \cdot I \quad (7)$$

onde  $\sigma_j^2$  é a variância associada ao ruído colorido,  $R_s$  é a matriz de covariância do sinal (sem ruído),  $\sigma_n^2$  é a variância do ruído branco e  $I$  representa a matriz identidade. Vale notar que a grandeza  $\sigma_j^2$  é adimensional, enquanto  $\sigma_n^2$  possui dimensão de potência, bem como  $R_s$  (Guerci, 2003).

A recuperação do sinal é realizada no *beamformer* através da resolução de um conjunto de equações lineares. Os elementos da matriz que correspondem ao filtro que contém os fatores que multiplicam o sinal recebido em cada canal são diretamente proporcional à matriz  $R^{-1}$ , através de  $w = k R^{-1} s$ , sendo  $k$  um escalar que obedece a condições de normalização e  $s$  o vetor complexo que contém os sinais recebidos em cada canal do *array*. Conhecendo-se, portanto, a relação entre a potência de *jammer* e a potência de ruído branco, fica definido o filtro a ser aplicado.

A relação entre a potência de ruído colorido no filtro STAP clássico e a potência associada às ambiguidades para a reconstrução da imagem com amostragem em mais um canal no sistema SAR será representada por:

$$\rho = \frac{\sigma_J^2}{\sigma_n^2} = \frac{\sigma_a^2}{\sigma_s^2 \cdot \sigma_n^2} = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} \cdot \frac{\sigma_a^2}{(\sigma_s^2)^2} \quad (7)$$

onde  $\rho$  representa a razão a ser estimada para construir a matriz de covariância  $R$ . As grandezas potência  $\sigma_a^2$  e  $\sigma_s^2$  são associadas, respectivamente, à potência de sinal ambíguo e potência do sinal recebido.

Conhecendo-se a relação linear entre o tempo em azimute e a frequência Doppler instantânea, é possível observar o comportamento do sinal recebido em cada canal em termos de frequência Doppler, como mostrado na Figura 5.

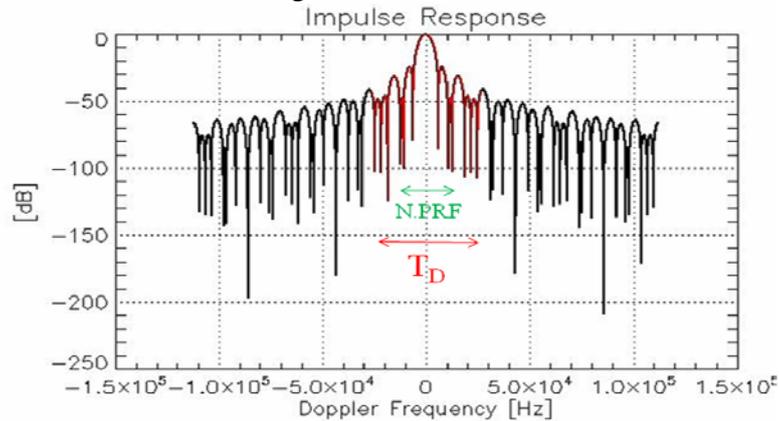


Figura 5: Eco recebido em um canal em azimute no domínio do tempo (Elarrat, 2010).

Na Figura 5  $T_D$  corresponde ao tempo de iluminação do sensor. A variância associada à potência  $\sigma_s^2$  pode ser estimada no intervalo espectral  $T_D$ . Fora deste intervalo, ou seja, afastado de onde espera-se encontrar o alvo pontual, faz-se uma avaliação da variância do ruído branco,  $\sigma_n^2$ . Finalmente a potência ambígua  $\sigma_a^2$  é avaliada dentro do intervalo temporal a ser considerado para processamento, porém fora da região em que não será possível recuperar o sinal, obedecendo ao teorema generalizado de Nyquist, ou seja, fora da banda de largura  $PRF \cdot N$  no domínio Doppler, também ilustrado na Figura 5.

O cenário para simulação de forma a observar o desempenho do algoritmo de reconstrução proposto apresenta uma antena transmissora de 2,45 m, 7 aberturas receptoras, cada uma com tamanho de 1,4 m em azimute, operando com comprimento de onda de 3,1 cm, com o sensor a uma altura de órbita de 520 km, imageando uma largura em range,  $W_g$ , de 70 km.

De forma a obter-se uma resolução da ordem de 1 metro, utilizou-se uma banda para processamento  $B_D = 6,5 kHz$ . Situações com diversos níveis de ruído na entrada foram propostos, variando-se também a PRF utilizada na missão. Desta forma pode-se estudar a degradação do desempenho do imageamento conforme afasta-se da situação ideal, que corresponde à PRF uniforme, cujo valor é de aproximadamente 1550 Hz.

### 3. Resultados

Os resultados do algoritmo utilizado podem ser verificados através das simulações realizadas no software IDL. Baseando-se no método proposto descrito anteriormente é possível estimar o perfil do filtro a ser utilizado no *beamformer* digital, ficando definido pela razão  $\rho$ , correspondente a certa relação entre a quantidade de filtro casado e filtro de reconstrução utilizados.

De forma a poder comparar o desempenho do filtro estimado, os dados foram filtrados utilizando-se diferentes proporções de ruído branco e ruído colorido, variando-se desde o filtro com objetivo de maximizar o SNR na saída (filtro casado) até o filtro com finalidade de suprimir as ambiguidades em azimuth.

Uma medida dos sinais combinados de ambiguidade no eixo azimuthal relativos ao lóbulo principal é denominada Azimuth-Ambiguity-to-Signal-Ratio (AASR) (Curlander e McDonough, 1991), podendo ser estimado utilizando-se a expressão (8), sendo  $G$  a função de define o perfil do sinal reconstruído.

$$AASR \approx \frac{\sum_{\substack{m=-\infty \\ m \neq 0}}^{\infty} \int_{-B_D/2}^{B_D/2} G^2(f + m \cdot PRF) df}{\int_{-B_D/2}^{B_D/2} G^2(f) df} \quad (8)$$

Para avaliação da deterioração SNR na saída do sistema de reconstrução, utilizou-se o conceito de figura de ruído. Assim, é mensurada a relação Signal-to-Noise-Scaling,  $\Phi_{bf}$ , entre o SNR na entrada de cada antena do *array* e o SNR na saída do *beamformer*. É possível também considerar a influência da reconstrução na potência de ruído observando o sinal após a etapa de processamento SAR monoestático, a focalização da imagem, levando a variável de desempenho  $\Phi_{bf,Bd}$  (Gebert, 2009)

Em um cenário em que os receptores captam sinais com SNR de 5 dB a Figura 6 mostra o comportamento da figura de ruído, em função da utilização de diversos filtros, ao longo de diferentes cenários de PRF.

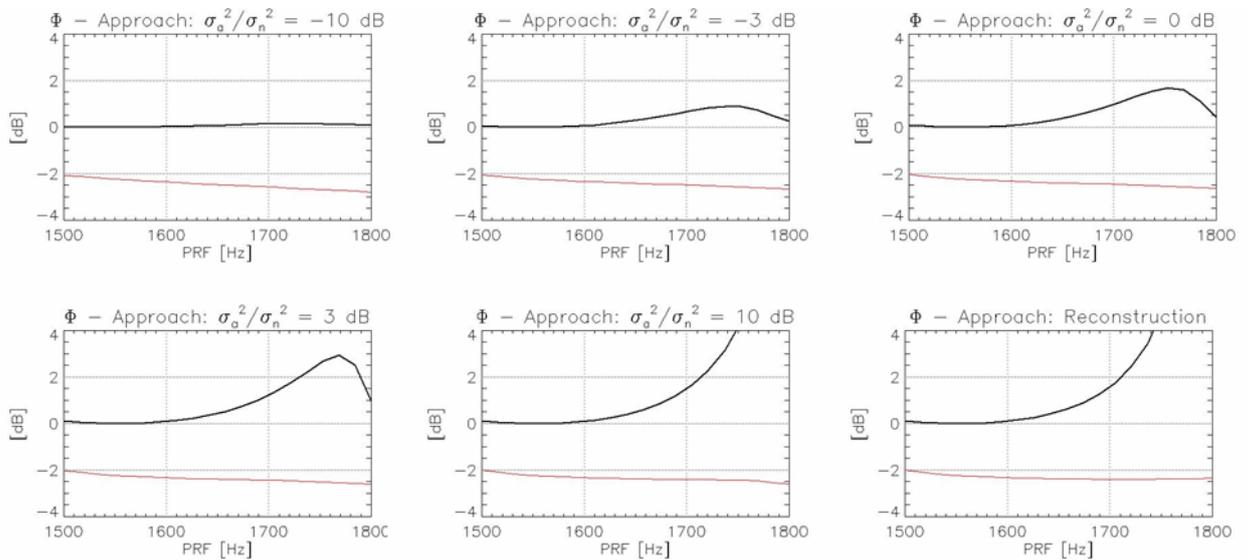


Figura 6: Comportamento da figura de ruído para uma banda reconstruída  $B_d = N \cdot PRF_u$  (preto) e  $B_d = 6.5$  kHz (vermelho) (Elarrat, 2010).

Na Figura 6 observa-se que o comportamento esperado é verificado. Quanto mais o filtro aplicado se aproxima de *Reconstruction Filter*, maior é a deterioração em termos de influência na potência de ruído quando se afasta do modo de operação com PRF uniforme. A utilização de filtros com razão  $\sigma_a^2 / \sigma_n^2$  baixa é favorável. Porém este cenário, que no seu caso extremo corresponde ao filtro casado, deve ser balanceado com componentes que suprimem as ambiguidades, obedecendo à condição destas estarem abaixo do nível de ruído (Gebert,

2009). Avaliando-se a AASR, verifica-se tal supressão em filtros com razão  $\sigma_a^2$  por  $\sigma_n^2$  acima do valor estimado de -3.78 dB.

A figura 7 ilustra a alta supressão para filtros cada vez mais próximos do filtro de reconstrução, confirmando o comportamento previsto em teoria.

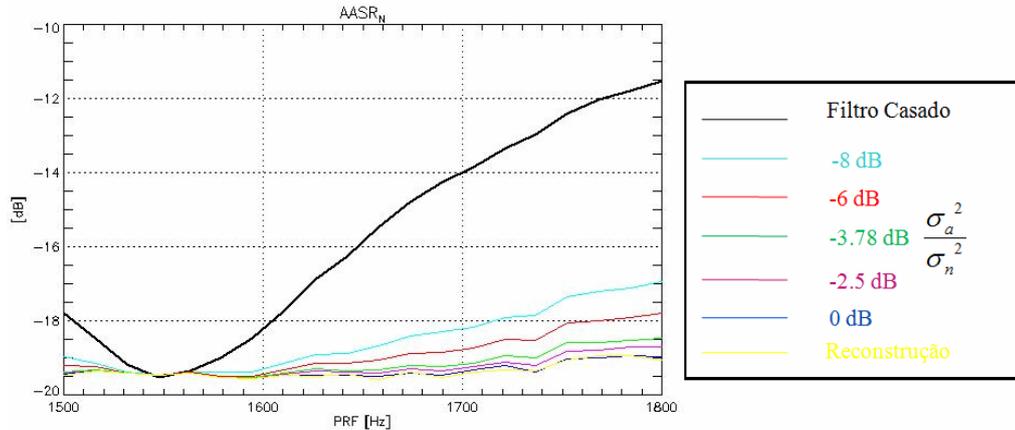


Figura 7: Comportamento da supressão de ambiguidades para diversos filtros (Elarrat, 2010).

Previsões para componentes de filtros de recuperação da imagem SAR também foram feitas para outros cenários com diferentes potências de ruído nos sinais recebidos. E a comparação entre o desempenho dos filtros mostrou a vantagem de se utilizar a combinação indicada, buscando um compromisso entre supressão de ambiguidade e melhora na figura de ruído.

#### 4. Conclusão

Neste trabalho, estudou-se e se implementou-se um método de reconstrução de sinais SAR recebidos por diversas subaberturas posicionadas em azimute, de forma a obter-se o imageamento com alta resolução em azimute de uma larga área imageada, cumprindo os requisitos de um sistema HRWS.

Para tanto foi necessário valer-se de fundamentos de processadores STAP, utilizados em geral para detecção de alvos na presença de *clutter* e *jamming* e adaptando-se a solução para o caso do sistema SAR com múltiplos canais, foi possível estimar coeficientes de filtros que compõem a etapa de construção da imagem SAR denominada *beamforming* digital. O desempenho de tal etapa foi avaliado para situações de operação fora da amostragem uniforme, levando-se em conta a supressão das ambiguidades provenientes da utilização de um *array* de antenas e ao mesmo observando a influência do *beamformer* na potência de ruído dos sinais recebidos.

#### Referências

- [1] ELARRAT, I. **Space-Time Adaptive Processing in Multi-Channel SAR Systems**. 2010. Trabalho de Graduação em Engenharia Eletrônica no Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil.
- [2] GEBERT, N. **Multi-Channel Azimuth processing for high-resolution wide-swath SAR imaging**. 2009. Dissertation Universität Karlsruhe (TH), Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, DLR-Forschungsbericht 2009-13, ISSN 1434-8454, Wessling, Germany.
- [3] CURLANDER, J. C.; MCDONOUGH, R. N. **Synthetic Aperture Radar, Systems and Signal Processing**. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [4] GUERCI, J. R., H. **Space-Time Adaptive Processing for Radar**. Norwood, Massachusetts: Artech House, 2003.