Avaliação Comparativa da Perda de Resolução Espacial de Filtros Redutores de Ruído "Speckle" *

SIDNEI J. S. SANT'ANNA[1]
NELSON D. A. MASCARENHAS[2]

[1]INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
DPI – Divisão de Processamento de Imagens
Avenida dos Astronautas, 1758
12227-010 São José dos Campos, SP, Brasil
sidnei@dpi.inpe.br

[2]Universidade Federal de São Carlos
Departamento de Computação
Via Washington Luiz Km 235
13565-905 São Carlos, SP, Brasil
dndm@power.ufscar.br

Abstract. The speckle noise in Synthetic Aperture Radar (SAR) images derives from the coherent ilumination of this system. To reduce the speckle noise, several filters have been proposed in the literature. In a previous work [Mascarenhas et al (1991)], a comparison among several classical speckle reduction filters was performed, from the point of view of signal-to-noise ratio improvement. The purpose of this work is to extend the previous work by analysing the classical filters and the new ones based on the theory of robust estimation, from the complementary point of view of spatial resolution loss. This is done by measuring the ability of the filters to preserve edges and by computing the blurring of the point spread function of an ideal point target due to filtering.

Key Words: synthetic aperture radar, speckle, filtering, edge detection, point spread function, resolution loss.

1 Introdução

Nos últimos anos a utilização de radares de abertura sintética em sensoriamento remoto vem aumentando significativamente. Os radares imageadores são sistemas ativos (possuem sua própria fonte de iluminação), podendo operar à noite. Os sensores de microondas, por operarem nesta faixa espectral, não são tão afetados por condições ambientais adversas, tais como nuvens, chuva, etc. como os sensores óticos, e estes comprimentos de onda são sensíveis às propriedades geométricas e dielétricas dos alvos na superfície terrestre.

As imagens SAR estão tendo um papel cada vez mais importante em sensoriamento remoto, o que fica evidente com o crescente número de trabalhos elaborados em mapeamento de estruturas geológicas, na discriminação de tipos de vegetação, no estudo de áreas alagadas e na identificação de culturas, entre outras aplicações. Contudo, é sabido que estas imagens possuem um ruído, denominado *speckle*, inerente à forma de imageamento destes sistemas.

O ruído *speckle* é causado pelas interferências construtivas e destrutivas da energia eletromagnética retroespalhada pelo alvo imageado, causando uma aparência granular, que é característica destas imagens. Este ruído diminui a habilidade do intérprete humano em fazer uma análise visual da área de interesse. Portanto, diversos filtros espaciais redutores de *speckle* (lineares, não lineares, adaptativos ou não, homomórficos, morfológicos, etc.) têm sido propostos a fim de aumentar a relação sinal-ruído destas imagens (que é muito baixa), bem como preservar os detalhes finos existentes nas mesma.

A não preservação de estruturas do tipo borda (detalhes finos) está diretamente relacionada à perda de resolução espacial das imagens causada pela aplicação de algoritmos de pós-processamento, tais como filtros. E é neste contexto que se insere este trabalho, no qual se propõe quantificar esta perda de resolução

*Este trabalho foi parcialmente desenvolvido com recursos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo No. 91/3532-2.

por dois métodos distintos: avaliando-se alguns filtros do ponto de vista da deteção de uma borda degrau ideal e do borramento da resposta impulsiva de um alvo pontual ideal.

Neste estudo são avaliados dez filtros que estão divididos em dois grupos, os filtros clássicos [Mascarenhas et al (1991)] e os filtros robustos desenvolvidos por [Frery e Sant'Anna (1993a e 1993b)]. No primeiro grupo têm-se os filtros da média, de Lee, de Kuan-Nathan (adaptativo ou não), de Frost e o de máximo *a posteriori* (*Maximum A Posteriori* – MAP). No segundo grupo encontram-se os filtros da mediana, da distância inter quartil (*Inter Quartil Range* – IQR), da mediana dos desvios absolutos da mediana (*Median Absolute Deviation* – MAD), de momentos aparados (*Trimmed Moments* – TMO) e de máxima verossimilhança aparada (*Trimmed Maximum Likelihood* – TML).

Com o objetivo de quantificar a perda de resolução espacial provocada pela aplicação destes diversos filtros, na Seção 2 encontrar-se-á um breve resumo descritivo dos filtros avaliados; na Seção 3 tem-se uma descrição dos critérios utilizados na avaliação; na Seção 4 é apresentado o conjunto de dados utilizado neste estudo, bem como a abordagem metodológica; na Seção 5 são expostos e discutidos os resultados alcançados e, finalizando, na Seção 6 são apresentadas as conclusões.

2 Filtros de Redução de "Speckle"

Nos últimos anos, com o aumento da utilização de imagens de radar de abertura sintética, tem sido proposta uma grande variedade de filtros redutores de *speckle*, com o intuito de aumentar a relação sinal-ruído e, simultaneamente, preservar a resolução das imagens.

Os filtros considerados neste estudo adotam um modelo de degradação para o sinal, excetuando-se o filtro da Média que não utiliza nenhum modelo específico. O modelo de degradação do sinal geralmente adotado é o modelo multiplicativo para o ruído: o valor observado ($Y(\omega)$) é o resultado do produto do sinal da cena ($X(\omega)$) pelo ruído ($N(\omega)$), considerando-se independência entre as variáveis aleatórias X e N.

A seguir estes filtros são descritos resumidamente.

2.1 Filtros Clássicos

- Filtro da Média: consiste da média aritmética dos pixels de uma janela local de processamento. Causa uma suavização indiscriminada na imagem filtrada.
- Filtro de Lee: consiste na minimização do erro médio quadrático através do filtro de Wiener, após uma linearização (por expansão em série de Taylor em torno da média) do modelo multiplicativo, transformando-o em aditivo.
- Filtro de Kuan/Nathan: é semelhante ao filtro de Lee, porém não realiza nenhuma aproximação em seu desenvolvimento. Na sua versão adaptativa [Mascarenhas et al (1991)] o tamanho da janela para computar a estatística local é variável, segundo o procedimento proposto por [Li, (1988)].
- Filtro de Frost: derivado da minimização do erro médio quadrático sobre o modelo multiplicativo. É convolucional, linear, e uma dependência entre os pixels é incorporada através de uma função de correlação exponencial.
- Filtro MAP: dadas duas variáveis aleatórias X e Y com função densidade de probabilidade conjunta $f_{XY}(x,y)$, a estimativa de máximo a *posteriori* de X dado $Y(\omega) = y$ é obtida maximizando-se a função densidade de probabilidade a *posteriori* com relação a x, isto é:

$$\hat{x}_{MAP} = max_{\mathbf{X}}^{-1}\{f_{X|Y=y}(x|y)\}.$$

O pixel filtrado poderá ser a solução da equação MAP, se a solução estiver entre a média e a observação, ou simplesmente a média local, se o coeficiente de variação do ruído for maior que o coeficiente de variação dos valores observados.

2.2 Filtros Robustos

Os filtros robustos apresentados nesta seção são desenvolvidos para imagens processadas em *1-look* e deteção linear, isto é, a distribuição marginal de observações correspondentes a áreas homogêneas obedece à distribuição Rayleigh. Uma variável aleatória possui distribuição Rayleigh com parâmetro $\theta \in \mathbb{R}^+$ se a sua função densidade de probabilidade e a sua função distribuição acumulada são dadas, respectivamente, por:

$$f_Y(y) = \left(\left(\frac{y}{\theta^2}\right)\exp\{-\frac{y^2}{2\theta^2}\}\right)\cdot \mathbb{1}_{\mathbb{R}^+}(y) \qquad (1)$$

e

$$F_Y(y) = \left(1-\exp\{-\frac{y^2}{2\theta^2}\}\right)\cdot \mathbb{1}_{\mathbb{R}^+}(y) \qquad (2)$$

onde θ é definido como coeficiente de retroespalhamento (*backscatter*) do alvo e $\mathbb{1}_{\mathbb{R}^+}(y)$ é a função indicadora do conjunto $\mathbb{R}^+$, dada por:

$$\mathbb{1}_{\mathbb{R}^+}(y) = \begin{cases} 1 & \text{se } y \in \mathbb{R}^+, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

A abordagem da filtragem de uma imagem SAR é realizada como uma estimação robusta do coeficiente de retroespalhamento (θ) dentro de uma janela de processamento. Desta forma, o parâmetro θ é estimado baseado num vetor de observações de tamanho n, $\mathbf{y}_W = (y_1, ..., y_n)$, utilizando-se os seguintes estimadores:

- Mediana

$$\widehat{\theta}_{\text{Med}} = \frac{1}{K_1} Q_2(\mathbf{y}_W) \tag{3}$$

onde $K_1 = \sqrt{2\ln(2)}$ e $Q_2(\mathbf{y}_W)$ é a mediana amostral de $\mathbf{y}_W$.

- Distância Inter Quartil (IQR)

$$\widehat{\theta}_{\text{IQR}} = \frac{Q_3(\mathbf{y}_W) - Q_1(\mathbf{y}_W)}{K_2}, \tag{4}$$

onde $K_2 = \sqrt{2\ln(4)} - \sqrt{2\ln(4/3)}$, $Q_1(\mathbf{y}_W)$ e $Q_3(\mathbf{y}_W)$ são os quartis amostrais inferior e superior de $\mathbf{y}_W$, respectivamente.

- Desvio Médio Absoluto (MAD)

$$\widehat{\theta}_{\text{MAD}} = \frac{1}{K_3} Q_2(\mathbf{z}_W), \tag{5}$$

onde $\mathbf{z}_W = (z_1, ..., z_n)$, $z_i = |y_i - Q_2(\mathbf{y}_W)|$ para todo $i \in W$ e $K_3 \approx 0.4485$ (obtido numericamente).

As constantes K_1, K_2 e K_3 que aparecem nas equações (3), (4) e (5) são calculadas de forma a tornar os respectivos estimadores assintoticamente consistentes.

- Momentos Aparados (TMO)

$$\widehat{\theta}_{\text{TMO}} = \left(\frac{1}{n-2\xi}\right)\sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=\xi+1}^{n-\xi} y_{n:i}, \tag{6}$$

- Máxima Verossimilhança Aparada (TML)

$$\widehat{\theta}_{\text{TML}} = \sqrt{\frac{1}{2(n-2\xi)} \sum_{i=\xi+1}^{n-\xi} y_{n:i}^2} \tag{7}$$

onde nas equações (6) e (7) $y_{n:i}$ representa $\mathbf{y}_W$ ordenado de forma ascendente e ξ é a quantidade das menores e maiores observações desprezadas.

Uma observação importante se faz necessária: pode ser provado que o estimador MAP transforma-se no estimador de máxima verossimilhança (ML) do *backscatter* θ quando a função densidade de probabilidade a priori - $f_\Theta(\theta)$ - é constante. Este estimador é dado por:

$$\widehat{\theta}_{ML} = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{n} y_i^2}. \tag{8}$$

A notação ML será utilizada para denotar este filtro MAP.

Ao leitor interessado em mais detalhes sobre estes filtros redutores de *speckle* recomendam-se as referências [Frery (1993)], [Frery–Sant'Anna (1993a e 1993b)], [Frost et al (1982b)], [Kuan et al (1987)], [Lee (1981a e 1981b)], [Mascarenhas et al (1991)], [Nathan–Curlander (1987)] e [Sant'Anna (1994)], além daquelas contidas nestas.

3 Critérios de Avaliação

A perda de resolução espacial em imagens de sensoriamento remoto pode afetar significativamente a classificação e/ou a segmentação automática, assim como a interpretação visual de uma dada imagem. Estas perdas são de difícil quantificação, e portanto propõem-se as abordagens baseadas na deteção de bordas e na resposta impulsiva de uma fonte pontual, descritas a seguir.

3.1 Deteção de Bordas

De acordo com [Frost et al (1982a)] uma borda em uma dada imagem pode ser definida como a transição entre áreas que tenham propriedades diferentes, que podem ser intensidade média, textura, ou taxa de variação da intensidade. Um operador utilizado para detetar tais transições é denominado um detetor de bordas.

A deteção de bordas pode ser representada por uma operação local aplicada a uma imagem (que serve para realçar ou acentuar alguma descontinuidade em um atributo da imagem), seguida por uma limiarização (a qual permite julgar a presença ou não de uma borda, dado um nível de limiar (τ)) e o resultado deste processo é um mapa de bordas da imagem. Este método é conhecido como realce e limiarização.

A idéia de avaliar a perda de resolução espacial em uma dada imagem após a aplicação de um determinado filtro vem do fato de que quanto maior é esta perda, maior é o borramento da borda, e pior é a sua deteção, isto é, a má deteção de uma borda é diretamente proporcional à perda de resolução espacial provocada pelo algoritmo de filtragem.

3.2 Resposta Impulsiva

Um sistema linear pode ser especificado por sua resposta ao impulso unitário, que caracteriza a função

de espalhamento pontual do sistema. Desta forma, em um sistema SAR, a resposta impulsiva de uma fonte pontual ideal fornece a função de espalhamento pontual deste sistema, sendo esta uma função bidimensional e proporcional ao coeficiente de retroespalhamento deste alvo pontual.

A resolução espacial de um sistema unidimensional pode ser definida como a distância (largura) entre dois pontos para os quais a intensidade do sinal da resposta impulsiva cai cerca de 50% do seu valor de pico (ponto de $3dB$). Nos sistemas SAR, sua função de resposta ao impulso, por ser bidimensional, possui duas medidas perpendiculares de largura no ponto de $3dB$, uma na direção de *range* e outra na direção de azimute. É importante observar que estas duas larguras (resoluções) definem a célula de resolução do radar.

A perda de resolução em uma imagem quantificada através da resposta impulsiva de um alvo pontual está relacionada ao fato de que quanto maior o borramento (alargamento e achatamento) desta função, maior é a perda de resolução, ou seja, esta perda é diretamente proporcional ao borramento da resposta impulsiva.

4 Descrição dos Dados e Metodologia

Os dados utilizados para realizar este trabalho experimental são duas imagens sintéticas (simuladas), para se ter um controle completo das suas propriedades geométricas e estatísticas.

Na simulação foram empregados dois métodos distintos:

1. Gera-se um conjunto de variáveis aleatórias Rayleigh independentes e sem correlação entre os pixels. Este método é semelhante ao utilizado por [Martin–Turner (1991)]. A imagem simulada possui um tamanho de 128 x 128 pixels e apresenta uma borda degrau ideal vertical e central que separa duas regiões com *backscatters* constantes de valores 10 e 100. Na Figura 1 é vista esta imagem, onde a parte esquerda possui o menor *backscatter*.

2. De maneira análoga, gera-se um campo de *speckle* com distribuição Rayleigh, adiciona-se uma função delta (para representar uma fonte pontual) e convolui-se este campo resultante com uma função de espalhamento pontual bidimensional de algum sistema SAR. A função utilizada aqui é a do sistema E-SAR da Agência Espacial Alemã (DLR), que foi determinada por [Fernandes et al (1992)]. A imagem gerada com este método é de tamanho 51 x 51 pixels, possui os pixels correlacionados devido à função de espalhamento pontual do sistema, e apresenta um alvo pontual ideal centralizado, cuja resposta impulsiva é mostrada na Figura 2.

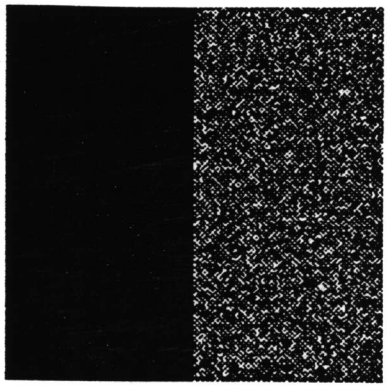

Figura 1: Imagem ruidosa com uma borda degrau ideal.

Figura 2: Resposta impulsiva bidimensional de um alvo pontual ideal.

Na abordagem da deteção de bordas utilizou-se o detetor que possui as mesmas características daquele empregado em [Sant'Anna (1994)], ou seja, o operador local considerado foi o cálculo do coeficiente de variação, definido pela razão entre o desvio padrão e a média, dentro de uma janela de processamento de tamanho 3 x 3 e um limiar τ igual à média das três colunas centrais da imagem original.

É necessário ainda que se tenha uma medida de inferência do detetor, e a medida escolhida é a figura de mérito proposta por [Pratt (1978)], dada por:

$$R = \frac{1}{max\{I_A, I_i\}} \sum_{i=1}^{I_A} \frac{1}{1 + \kappa d_i^2} \qquad (9)$$

onde I_A representa o número de pontos detetados, I_i é o número de pontos da borda ideal, κ é uma constante de escala e d_i é a distância entre o ponto detetado e a borda ideal. O valor da constante κ considerado é igual a 1/9 e cabe observar que para esta figura de mérito, obtém-se $R = 1$ quando uma

borda é perfeitamente detetada e este valor diminui com o aumento do erro no mapa de bordas.

Desta forma, os seguintes passos foram seguidos:

1. Filtragem da imagem sintética;
2. Deteção da borda na imagem filtrada; e
3. Cálculo de R para análise da perda de resolução.

Na metodologia da resposta impulsiva a avaliação da perda de resolução é realizada simplesmente computando-se as resoluções nas direção de *range* (δ_r) e azimute (δ_a), no ponto de $4dB$ da função da resposta impulsiva de um alvo pontual ideal. Em seguida obtém-se a resolução total, que neste trabalho é definida como a área de uma elipse que possui seus semi-eixos dados por δ_r e δ_a. O ponto de $4dB$ foi escolhido para o cálculo das resoluções nas duas direções a fim de se manter uma coerência com os trabalhos de [Fernandes et al (1992)] e [Fernandes (1993)].

Todas as imagens foram filtradas com janela quadrada de tamanho 5 (com exceção do algoritmo de Kuan na sua versão adaptativa, que utiliza janelas de tamanho variável) e nos algoritmos aparados (TMO e TML) utilizou-se uma quantidade de observações desprezadas igual a 10, isto é, $\xi = 5$.

5 Resultados e Discussão

Os resultados obtidos com as abordagens descritas na Seção 4 são apresentados na Tabela 1. Nesta tabela são encontrados os valores medidos para cada filtro avaliado, da figura de mérito (R) e da resolução total normalizada (δ_{TN}). A referida normalização é realizada com relação à resolução total da imagem original que será, na melhor das hipóteses, a máxima resolução alcançada. Assim sendo, δ_{TN} é definido como a razão entre a área da elipse da imagem original em $-4dB$ e a área da mesma elipse da imagem filtrada.

O filtro de Lee, nestas duas abordagens, possui resultados idênticos àqueles obtidos pelo filtro de Kuan; portanto não serão expostos os seus resultados e os comentários feitos para o filtro de Kuan se adequam perfeitamente ao filtro de Lee.

Da Tabela 1 pode-se notar que o pior e o melhor filtro com relação à deteção de bordas são os filtros IQR e de Frost, respectivamente e que o desempenho dos filtros robustos (não considerando o IQR) é superior ao dos filtros clássicos, excetuando-se o filtro de Frost. Em geral, neste critério o comportamento dos filtros é bem semelhante, pois a variação máxima entre as figuras de mérito (da ordem de 25%) é significativamente pequena. Os mapas de bordas obtidos para cada algoritmo são vistos na Figura 3.

	R	δ_{TN}	Norma $\mathcal{L}2$
Original	1.000	1.000	0.000
Ruidosa	0.862	—	—
Média	0.863	0.830	0.218
Mediana	0.956	0.847	0.159
IQR	0.716	0.364	0.697
MAD	0.961	0.380	0.621
TMO	0.945	0.778	0.229
TML	0.928	0.698	0.311
ML	0.855	0.596	0.429
Kuan	0.764	0.732	0.357
Kuan Adapt.	0.838	0.746	0.301
Frost	0.964	0.894	0.112

Tabela 1: Valores obtidos da Figura de Mérito (R), Resolução Total Normalizada (δ_{TN}) e da Norma $\mathcal{L}2$.

Da Figura 3 (c), (h) e (i) nota-se que os filtros IQR, de Kuan e de Kuan Adaptativo mostram bordas espúrias detetadas, sendo que aquele borra mais a borda do que estes dois. Para estes três filtros foram encontrados os valores mais baixos da figura de mérito e os filtros de Kuan e Kuan Adaptativo apresentam uma borda bem mais fragmentada do que a apresentada pelo IQR.

O filtro da Média e o ML apresentam mapas de bordas semelhantes (Figura 3 (a) e (g), respectivamente), verificando-se assim os valores bem próximos de suas figuras de mérito. E ambos filtros borram (de forma semelhante) mais a borda do que os outros filtros, como se observa pelo maior número de pixels detetados como borda neste filtros.

O borramento da borda causada pelos filtros TMO e TML é menos acentuado que o causado pelos filtros da Média, ML e IQR. Assim, a deteção da borda após a passagem daqueles dois filtros é melhor, como se pode observar através do número de pixels detetado como pontos de bordas (vide Figura 3 (e) e (f)). Nestes mapas de bordas nota-se que o número de pontos detetados como borda pelos filtros TMO e TML é menor que os detetados pelos filtros da Média, ML e IQR.

Os mapas de bordas para os filtros da Mediana, MAD e de Frost (Figura 3 (b), (d) e (j), respectivamente) mostram as melhores deteções da borda degrau. Nestes mapas o número de pixels erroneamente detetados como pontos de bordas é menor que nos demais mapas, ou seja, o borramento da borda causado pela aplicação destes filtros é menos intenso que o causado pelos outros filtros. Portanto, segundo este critério, estes filtros são os que menos degradam

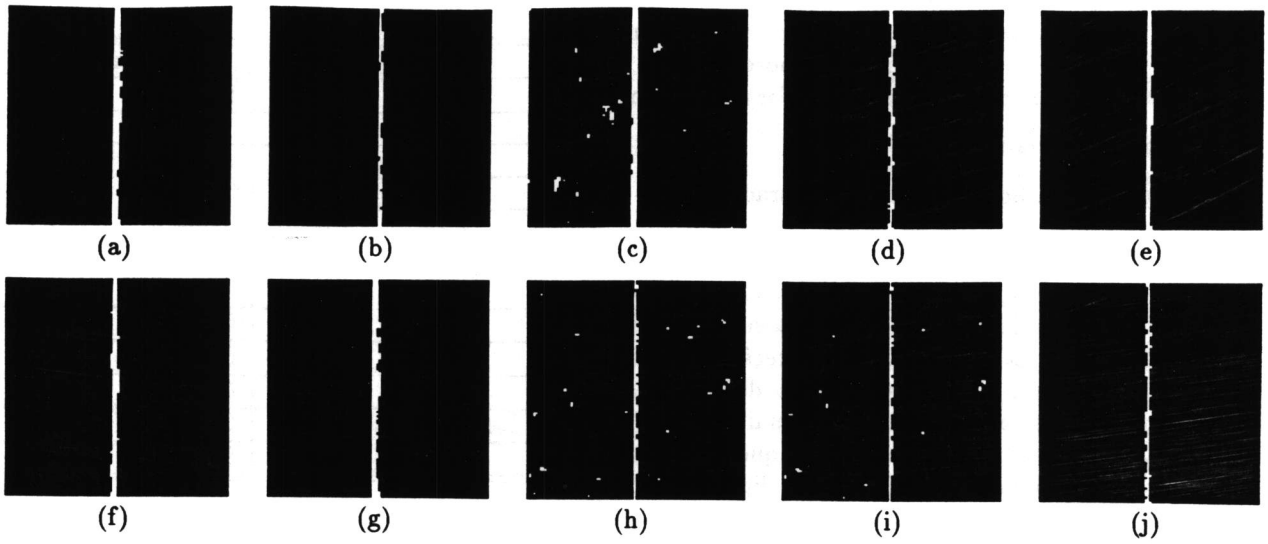

Figura 3: Mapas de bordas dos filtros: (a) Média, (b) Mediana, (c) IQR, (d) MAD, (e) TMO, (f) TML, (g) ML, (h) Kuan Fixo, (i) Kuan Adapt. e (j) Frost.

a resolução espacial da imagem filtrada.

Já com relação à resposta impulsiva, os filtros do IQR e do MAD obtiveram os piores desempenhos, enquanto os filtros da Mediana e de Frost alcançaram os melhores. Nota-se também uma variação máxima (cerca de 53%) maior que a da figura de mérito, devido aos desempenhos dos filtros IQR e MAD, que são muito distintos dos demais filtros. Estes desempenhos, considerados anômalos, decorrem do fato de a resposta impulsiva do alvo pontual, após a passagem destes filtros, possuir um vale, causando assim uma resposta com dois picos, como é observado nas Figuras 4 e 5. Caso não se considere estas anomalias, as variações máximas de R e δ_{TN} possuem, praticamente, a mesma ordem de grandeza.

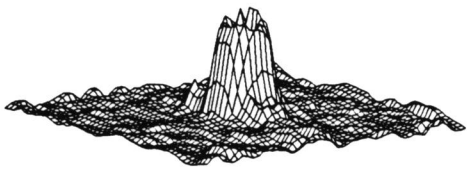

Figura 4: Resposta impulsiva bidimensional de um alvo pontual ideal, para o filtro IQR.

Na Figura 6 são ilustradas as elipses que tiveram seus semi-eixos (ou seja, δ_r e δ_a) degradados pela atuação dos dois piores e dos dois melhores filtros e também a elipse original. Nesta figura a elipse original é representada pela linha contínua, as duas elipses exteriores obtidas pelos filtros IQR e MAD são representadas pelas linhas tracejada e traço-pontilhada, respectivamente e as duas elipses interiores obtidas pela aplicação dos algoritmos da Mediana e de Frost são representadas pelas linhas traço-pontilhada e tracejada, respectivamente. As elipses para os outros filtros estão limitadas por estas quatro anteriores.

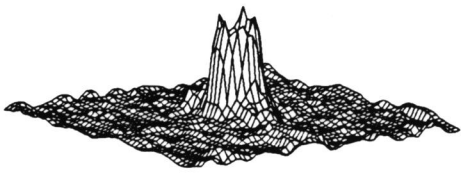

Figura 5: Resposta impulsiva bidimensional de um alvo pontual ideal, para o filtro MAD.

Observando-se apenas a Tabela 1 não se tem uma idéia da existência de uma relação funcional explícita entre as duas medidas de perda de resolução espacial; portanto, construiu-se o gráfico da Figura 7, onde se observa que os filtros, de um modo geral, se comportam de forma semelhante nos dois critérios de avaliação, exceção feita aos filtros IQR e MAD que possuem um comportamento anômalo com relação à resposta impulsiva e ao filtro de Kuan com relação à figura de mérito.

Considere, então, que um critério C_i, onde $C_i \in [0,1]$ e $1 \leq i \leq n$, possa representar alguma medida de qualidade sobre um dado filtro e em relação a algum método de avaliação dos filtros. Então dir-se-á que o filtro $\mathcal{F}_a$ será "melhor" que o filtro $\mathcal{F}_b$ em relação ao critério i se $\mathcal{F}_a < \mathcal{F}_b$. Desta forma,

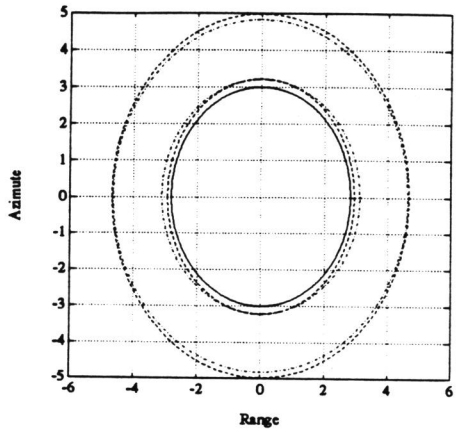

Figura 6: Elipse da resposta impulsiva para os filtros IQR, MAD, Mediana e Frost.

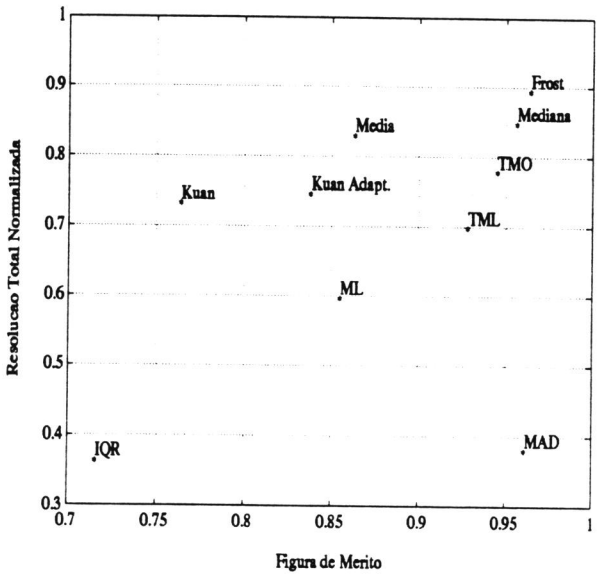

Figura 7: Relação funcional entre a figura de mérito e a resolução total normalizada.

pode-se pensar em medir a distância $d_{\mathcal{L}}$ do ponto $C(\mathcal{F}_a) = (C_1(\mathcal{F}_a), \cdots, C_n(\mathcal{F}_a))$, a um ponto P qualquer do espaço $\mathbb{R}^n$ e compará-la com as distâncias $C(\mathcal{F}_b)$, $C(\mathcal{F}_c)$, etc. Aceito este critério, o "melhor" filtro (em relação a distância $d_{\mathcal{L}}$) será aquele que minimize $d_{\mathcal{L}}$. A distância $d_{\mathcal{L}}$ utilizada foi a norma $\mathcal{L}2$ em $\mathbb{R}^2$ e definida, com relação ao ponto $P_1 \equiv (1,1)$, por:

$$d_{\mathcal{L}}(C, P_1) = \sqrt{\sum_{i}^{n} (C_i - 1)^2} \qquad (10)$$

Este critério da norma $\mathcal{L}2$ é uma tentativa de unificar as duas medidas de perda de resolução espacial, e seus valores são encontrados na quarta coluna da Tabela 1.

Fazendo-se uso do critério da norma ordenou-se, do pior para o melhor, os filtros com relação a perda de resolução, obtendo-se assim a seguinte ordem: IQR, MAD, ML, Kuan, TML, Kuan Adaptativo, TMO, Média, Mediana e Frost.

6 Conclusão

Neste trabalho, a avaliação da perda de resolução de filtros redutores de *speckle* em imagens SAR foi feita através de dois critérios: preservação de bordas e borramento da resposta impulsiva de um alvo pontual. Em ambos os critérios, o filtro de Frost apresentou o melhor desempenho.

Deve-se observar algumas limitações das avaliações efetuadas:

- quanto à deteção de bordas, poderá haver variações nos resultados, pela escolha de um outro tipo de detetor ou de limiar; e
- quanto ao borramento da resposta impulsiva, deve-se notar [Ulaby e Dobson (1989)] que a presença de um alvo pontual predominante implica na distribuição de Rice para o *speckle*, ao invés de Rayleigh. O tipo de simulação utilizado resultou em ruído *speckle* com distribuição Rayleigh e aditivo, ao invés de Rice e multiplicativo, na região do alvo pontual.

A filtragem do *speckle* após a geração da imagem é, em geral, mais eficiente do que a filtragem efetuada durante a geração da imagem, pela aquisição de várias visadas (*looks*). Tal fato se deve à utilização da informação do conteúdo da imagem no primeiro caso.

Uma continuação do trabalho poderia envolver a consideração simultânea dos critérios conflitantes de melhoria da relação sinal-ruído e perda de resolução dos filtros clássicos e robustos e da filtragem *a priori*, pela aquisição da imagem através de várias visadas.

7 Referências

Fernandes, D. *Formação de imagens de radar de abertura sintética e modelos da relação "speckle"-textura.* (Tese de Doutorado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, nov. 1993.

Fernandes, D.; Mascarenhas, N.D.A; Sakane, F.T. Função espalhamento pontual em imagens de um radar de abertura sintética (SAR). In: Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens, 5., Águas de Lindóia, 14–17 nov. 1992. São José dos Campos, INPE, 1992, p. 47–54.

Frery, A.C. *Algumas ferramentas estatísticas na síntese, processamento e análise de imagens de radar de abertura sintética.* (Tese de Doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, dez. 1993. 228 p. (INPE -5548-TDI/534).

Frery, A.C.; Sant'Anna, S.J.S. Redução de ruído em imagens SAR pelo uso de filtros robustos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7., Curitiba, 10–14 maio 1993. *Anais.* São José dos Campos, INPE/SBC, 1993a, v. 3., p. 433-443.

Frery, A.C.; Sant'Anna, S.J.S. Non-adaptive robust filters for speckle noise reduction. Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens, 6., Recife, PE, 19–22 out. 1993b.

Frost, V.S.; Shanmugan, K.S.; Holtzman, J.C. Edge detection for synthetic aperture radar and other noisy images. In: 1982 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'82), Munich, June 1–4, 1982a. *Proceedings.* New York, IEEE. p. 4.1–4.9.

Frost, V.S.; Stiles, J.A.; Shanmugan, K.S.; Holtzman, J.C. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* PAMI-4:157–166, 1982b.

Goodman, J.W. Statistical properties of laser speckle patterns. In: Dainty, J.C., ed. *Laser Speckle and Related Phenomena,* chap. 2, Springer-Verlag, 1982.

Kuan, D.T.; Sawchuk, A.A.; Strand, T.C.; Chavel, P. Adaptive restoration of images with speckle. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing,* ASSP-35(3):373–383, Mar. 1987.

Lee, J.S. Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images. *Computer Graphics and Image Processing,* 17:24–32, 1981a.

Lee, J.S. A simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture radar images. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics,* SMC-13:85–89, 1981b.

Li, C. Two adaptive filters for speckle reduction in SAR images by using the variance ratio. *International Journal of Remote Sensing,* 9(4):641–653. 1988.

Martin, F.J.; Turner, R.W. SAR speckle reduction by weighted filtering. Winchester, IBM UK Scientific Center. 1991.

Mascarenhas, N.D.A.; Ono, S.E.; Fernandes, D.; Kux, H.J.H. A comparative study of speckle reduction filters in SAR images and their application for classification performance improvement. In: Twenty-Fourth International Symposium on Remote Sensing of Environment (ERIM), Rio de Janeiro, May 1991. *Proceedings.* v.2, p. 911–923.

Nathan, K.S.; Curlander, J.C. Speckle noise reduction of 1-look SAR imagery. In: *Proceedings of IGARSS'87 Symposium.* Ann Harbour, 18–21 May 1987.

Sant'Anna S.J.S. *Avaliação do desempenho de filtros redutores de "speckle" em imagens de radar de abertura sintética.* (Tese de Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 1994. (Em preparação).

Ulaby, F.T.; Dobson, M.C. *Handbook of radar scattering statistics for terrain.* Norwood, MA, Artech House, 1989.