

CARACTERIZAÇÃO DO "SPECKLE" EM IMAGENS DE AMPLITUDE DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR)

David Fernandes¹

Fernando Toshinori Sakane¹

Nelson Delfino D'Avila Mascarenhas²

¹ ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica
12228-900 S. José dos Campos, SP, Brasil
FAX: (0123)22-9195

² INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Divisão de Processamento de Imagens
12201-970 C.P.515 S. José dos Campos, SP, Brasil
nelson@dpi.inpe.br

Abstract. A model for the speckle noise in Synthetic Aperture Radar (SAR) amplitude images that takes into account the point spread function of the SAR is proposed. The concept of speckle-image is developed and its relationship with the texture or other image information is shown. Theoretical proprieties of the speckle model are compared with the proprieties of the speckle in real images generated at INPE from data collected by the E-SAR system of the German Space Agency, DLR.

1. Introdução.

O "SPECKLE" é um tipo de granuloseidade que aparece quando uma imagem é formada através da iluminação de uma cena ou de um objeto por uma radiação coerente, supondo-se que a cena ou o objeto possui rugosidades da ordem do comprimento de onda da radiação, [Goodman (1976)].

Fernandes, Mascarenhas e Sakane [1992] elaboraram um modelo matemático que descreve a formação da imagem SAR (Synthetic Aperture Radar) e determinaram a Função Espalhamento Pontual de um sistema imageador SAR. Desse modelo, conclui-se que o processo de formação de imagem SAR é coerente e que uma amostra da imagem (pixel ou *picture element*) é formada pela somatória das reflexões independentes originadas em uma célula de resolução, a qual é definida pela Função Espalhamento Pontual.

Sendo assim, a amplitude de um pixel da imagem é o resultado da interferência construtiva-destrutiva das reflexões da onda eletromagnética, provocada pelos elementos refletores que se encontram dentro de uma célula de resolução. De uma célula para outra muda a configuração e os tipos de refletores, mudando desta forma o valor do novo pixel. A variação do valor dos pixels é caracterizada como sendo o "speckle", desde que os refletores dentro de uma célula de resolução representem a rugosidade da superfície, da ordem do comprimento de onda da radiação eletromagnética.

O "speckle" é encontrado em imagens geradas por LASER, SAR, radar de rádio astronomia e imageadores acústicos, sistemas esses cujo processo de demodulação do sinal eco é coerente. Normalmente o "speckle" é caracterizado como ruído, pois a sua presença degrada alguns tipos de informações contidas na imagem.

Um tipo de informação presente na imagem recebe o nome de textura. Textura é a propriedade que permite segmentar uma imagem em diversos campos. Campo é a região da imagem que representa uma parte de uma cena imageada, a qual possui determinadas características geométricas, eletromagnéticas e estatísticas. Características essas que influem na reflexão da onda incidente. A textura também pode ser definida como um padrão espacial que caracteriza um campo de uma imagem.

Diferentes texturas permitirão a classificação dos diferentes campos de uma imagem, conforme o seu correspondente na cena real. Nas imagens SAR, o "speckle" tende a prejudicar a observação da textura, prejudicando assim os processos de segmentação e classificação de imagens.

Propõe-se na Seção 2 um modelo matemático da densidade de refletividade da cena imageada que origina o "speckle" nas imagens SAR.

Na Seção 3 define-se o conceito de imagem-"speckle" amplitude. Essa imagem representa cenas com rugosidade da ordem do comprimento de onda da radiação eletromagnética.

A validação experimental dos conceitos propostos nesse trabalho é feita na Seção 4, através da análise do histograma e da função de autocovariância de campos de uma imagem SAR do sistema E-SAR/DLR.

No Apêndice B faz-se a extensão dos modelos propostos para imagens SAR complexa e intensidade.

2. Modelamento da densidade de refletividade.

Pode-se obter diversas imagens descorrelacionadas de uma cena utilizando-se algum tipo de diversidade no processo de geração do sinal eco. Por exemplo: diversidade espacial, quando se observa a cena de pontos diferentes; diversidade em frequência, mudando-se o valor da frequência da portadora da onda eletromagnética e diversidade de polarização, mudando-se a polarização da onda transmitida e selecionando-se o tipo de polarização da onda recebida.

A amplitude complexa de um pixel, correspondente à célula de resolução centrada em (x_m, y_n) na cena, da v -ésima imagem de um conjunto de N imagens obtidas por um método de diversidade, é dada pela convolução entre a densidade de refletividade da cena e a Função de Espalhamento Pontual, [Fernandes et al. (1992)]:

$$\begin{aligned} \tilde{f}^{(v)}(x_m, y_n) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \tilde{c}^{(v)}(x_k, y_i) \tilde{f}_p^{(v)}(x_m - x_k, y_n - y_i) \\ &\stackrel{\Delta}{=} \tilde{f}_{m,n}^{(v)} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \tilde{c}_{k,i}^{(v)} \tilde{f}_{p_{m-k,n-i}}^{(v)} \quad (2.1) \end{aligned}$$

onde: $\tilde{c}^{(v)}(\cdot, \cdot)$ é a densidade de refletividade complexa da cena imageada [Apêndice A] e $\tilde{f}_p^{(v)}(\cdot, \cdot)$ é a Função Espalhamento Pontual do SAR relativa à v -ésima imagem.

Nesse trabalho, propomos que a variável aleatória densidade de refletividade, $\tilde{c}_{k,i}^{(v)}$, pode ser decomposta como o produto de duas componentes:

$$\tilde{c}_{k,i}^{(v)} = \tilde{a}_{k,i}^{(v)} \tilde{b}_{k,i}^{(v)} \quad (2.2)$$

e mostraremos que este modelo permite uma melhor compreensão da estrutura de formação de imagens SAR contaminadas por "speckle".

A componente $\tilde{b}_{k,i}^{(v)}$ é uma densidade de refletividade que origina o "speckle", relacionado à rugosidade da ordem do comprimento de onda da portadora, e a componente $\tilde{a}_{k,i}^{(v)}$ representa uma função estocástica de ajuste, que permite a representação de cenas com densidades de refletividade mais complexas a partir das cenas com densidade de refletividade $\tilde{b}_{k,i}^{(v)}$.

O modelo multiplicativo representado pela expressão (2.2) implica as seguintes hipóteses:

- i. Um campo de uma imagem SAR contém sempre "speckle".
- ii. O "speckle" é o elemento básico de qualquer campo de uma imagem SAR, no sentido de que a partir dele pode-se gerar campos diferentes, através da função de ajuste $\tilde{a}_{k,i}^{(v)}$.
- iii. A função $\tilde{a}_{k,i}^{(v)}$ contém informação a respeito da cena imageada.

A primeira hipótese é verdadeira pela própria definição de "speckle" e a terceira hipótese é consequência da segunda.

Mostra-se ao longo desse trabalho que a segunda hipótese é compatível com o conceito de imagem-"speckle", que será desenvolvido na Seção 3. Na Seção 4, mostra-se que a segunda e terceira hipóteses são coerentes com a análise realizada em diversos campos de uma imagem real.

Com (2.2) em (2.1):

$$\tilde{f}_{m,n}^{(v)} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \tilde{a}_{k,i}^{(v)} \tilde{b}_{k,i}^{(v)} \tilde{f}_{p_{m-k,n-i}}^{(v)} \quad (2.3)$$

Consideremos um campo qualquer de uma imagem. Em relação a este campo faremos a seguinte hipótese:

- iv. $\tilde{b}_{k,i}^{(v)}$ pertence à v -ésima realização de um processo aleatório complexo gaussiano, estacionário e branco em (v) e em (k, i) , de média zero, [Apêndice A].

A média e a correlação desse processo são dadas respectivamente por:

$$E[\tilde{b}_{k,i}^{(v)}] = 0 \quad \forall (k, i) \text{ ou } (v) \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \text{COR}[\tilde{b}_{k,i}^{(v)}, \tilde{b}_{r,s}^{(p)}] &= E[\tilde{b}_{k,i}^{(v)} \cdot \tilde{b}_{r,s}^{(p)*}] \\ &= \sigma_b^2 \cdot \delta(k-r, i-s, v-p) \quad (2.5) \end{aligned}$$

onde σ é o desvio padrão de $\tilde{b}_{k,i}^{(v)}$ e $\delta(\cdot, \cdot, \cdot)$ é o delta de Kronecker tridimensional:

$$\delta(k-r, i-s, v-p) = \begin{cases} 1 & \text{se } k=r, i=s \text{ e } v=p \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

3. Modelamento do "speckle".

Inicialmente definiremos os tipos usuais de imagens SAR de N visadas, obtidas através da média aritmética de N imagens de uma visada:

a. *imagem complexa*, representada por:

$$\tilde{F}_{m,n} = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^N \tilde{f}_{m,n}^{(v)} \quad (3.1)$$

b. *Imagem amplitude*, representada por:

$$F_{A_{m,n}} = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^N \left| \tilde{f}_{m,n}^{(v)} \right| \quad (3.2)$$

c. *Imagem intensidade*, representada por:

$$F_{I_{m,n}} = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^N \left| \tilde{f}_{m,n}^{(v)} \right|^2 = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^N \tilde{f}_{m,n}^{(v)} \tilde{f}_{m,n}^{(v)*} \quad (3.3)$$

Pode-se ainda ter outros tipos de imagens, tais como: a raiz quadrada e o logaritmo da imagem intensidade, [Ulaby et al. (1986)], [Arsenault - April (1976)].

$$F_{R_{m,n}} = \sqrt{F_{I_{m,n}}} \quad (3.4)$$

$$F_{L_{m,n}} = \ln(F_{I_{m,n}}) \quad (3.5)$$

3.1 Imagem-"speckle".

Define-se *imagem-"speckle"* como aquela que é formada apenas pela micro-rugosidade da cena (rugosidades da ordem do comprimento de onda da portadora) e que tem as seguintes características:

- i. *um pixel da imagem complexa de uma única visada é uma variável aleatória complexa gaussiana de média nula.*
- ii. *um pixel da imagem amplitude de uma única visada é uma variável aleatória com densidade de probabilidade Rayleigh.*
- iii. *um pixel da imagem intensidade de uma única visada é uma variável aleatória com densidade de probabilidade Exponencial.*

A característica "i" é justificada pela própria definição de imagem-"speckle", pois a densidade de refletividade que representa a micro-rugosidade é uma variável aleatória complexa gaussiana de média zero [Apêndice A] e um pixel da imagem é formado pela somatória, ponderada pela Função Espalhamento Pontual, dessas densidades conforme (2.3).

As características "ii" e "iii" são consequências da característica "i" e das relações expressas por (3.2) e (3.3).

Define-se a *imagem-"speckle" normalizada* como a imagem-"speckle" com as seguintes características adicionais:

- iv. *para a imagem complexa: as componentes real e imaginária de um pixel da imagem de uma única visada têm variância unitária.*
- v. *para as imagens amplitude e intensidade: um pixel da imagem de uma única visada tem média unitária.*

Mostra-se nessa Seção e no Apêndice B que a imagem-"speckle" normalizada representa uma imagem sem informação e que a informação contida na imagem-"speckle" pode ser representada através de $\tilde{a}_{m,n}^{(v)}$ ou de um funcional dessa grandeza.

Mostra-se ainda, que a imagem-"speckle" é representada por um modelo multiplicativo entre $\tilde{a}_{m,n}^{(v)}$ e a imagem-"speckle" normalizada.

O "speckle" aparece com muita frequência na literatura como sendo um ruído multiplicativo de uma imagem SAR qualquer, [Goodman (1976)], [Frost et al. (1982)], [Ulaby et al. (1986)], [Lee (1986, 1987)], [Kuan et al. (1987)], [Nathan - Curlander (1987)], [Li (1988)], [Brooks - Bovik (1990)]. Nessa Seção mostra-se sob que hipóteses este modelo de ruído multiplicativo pode ser considerado válido.

Nessa Seção é apresentado o desenvolvimento do modelo teórico para a imagem amplitude e a sua validação experimental é feita na seção 4. Os modelos para as imagens complexa e intensidade são apresentados no Apêndice B.

3.2 Análise da imagem amplitude.

A imagem-"speckle" normalizada amplitude de uma única visada será representada por:

$$f_{a_{m,n}}^{(v)} = \left| \tilde{f}_{a_{m,n}}^{(v)} \right| \quad (3.6)$$

onde:

$$\tilde{f}_{a_{m,n}}^{(v)} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \tilde{b}_{a_{ki}}^{(v)} \tilde{f}_{P_{m-k,n-i}}^{(v)} \quad (3.7)$$

Pela definição de imagem-"speckle" normalizada, a densidade de refletividade $\tilde{b}_{a_{ki}}^{(v)}$ é uma variável aleatória complexa gaussiana de média zero e variância tal, que a média de $f_{a_{ki}}^{(v)}$ é unitária.

Como $\tilde{b}_{a_{ki}}^{(v)}$ é uma variável aleatória complexa gaussiana de média zero $f_{a_{m,n}}^{(v)}$ é uma variável aleatória com densidade de probabilidade Rayleigh, [Papoulis (1984)].

A imagem-"speckle" amplitude de N visadas será definida por

$$F_{A_{m,n}} = a_{m,n} F_{a_{m,n}} \quad (3.8)$$

onde:

$$a_{m,n} = \left| \tilde{a}_{m,n} \right| \quad (3.9)$$

$$F_{a_{m,n}} = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^N f_{a_{m,n}}^{(v)} \quad (3.10)$$

$F_{a_{m,n}}$ representa a imagem-"speckle" amplitude normalizada de N visadas. Como é a média de variáveis aleatórias decorrelacionadas com densidade de probabilidade Rayleigh, a expressão analítica de sua densidade de probabilidade é de difícil obtenção.

Como a média de $f_{a_{m,n}}$ é unitária tem-se:

$$E[F_{a_{m,n}}] = 1 \quad (3.11)$$

Comparando-se (3.8) com (3.2), tendo-se em conta (3.6), (3.7), (3.9), (3.10), e (2.3), conclui-se que a imagem-"speckle" amplitude tem densidade de refletividade:

$$\tilde{b}_{k,i}^{(v)} = \tilde{b}_{a_{k,i}}^{(v)} \quad (3.12)$$

e que a função $\tilde{a}_{k,i}^{(v)}$ é independente da visada (v) e localmente invariante, ou seja, constante dentro dos limites de uma célula de resolução:

$$\tilde{a}_{k,i}^{(v)} = \tilde{a}_{m,n} \quad (k,i) \in CR[(m,n)] \quad (3.13)$$

onde $CR[(m,n)]$ significa "célula de resolução centrada em (x_m, y_n) ".

Como $F_{A_{m,n}}$ representa a imagem-"speckle" amplitude, a sua distribuição deve ter a mesma forma da distribuição de $F_{a_{m,n}}$.

Para ilustrar admitamos uma única visada ($N=1$). A densidade de probabilidade de um pixel, de um campo da imagem-"speckle", será dada pela função Rayleigh com parâmetro α :

$$p(F_{A_{m,n}}) = \frac{F_{A_{m,n}}}{\alpha^2} \exp\left\{-\frac{F_{A_{m,n}}}{2\alpha^2}\right\} \quad (3.14)$$

Para o caso de N visadas, considerando-se que cada uma das visadas possui a distribuição Rayleigh dada por (3.14), a média e o desvio padrão de um pixel do campo da imagem são dados respectivamente por:

$$E[F_{A_{m,n}}] = \sqrt{\pi/2} \alpha \quad (3.15)$$

$$VAR[F_{A_{m,n}}] = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \frac{\alpha^2}{N} \quad (3.16)$$

Desta forma um campo da imagem-"speckle", de N visadas, pode ser representada por (3.8), com:

$$a_{m,n} = E[F_{m,n}] \quad (3.17)$$

Nota-se que a função $a_{m,n}$ contém a informação sobre um campo da imagem-"speckle".

3.3 Número equivalente de visadas.

Define-se a Relação Sinal Ruído de um pixel (m,n), de um campo de uma imagem não complexa, como a razão entre a sua média ao quadrado e a sua variância, [Ulaby et al. (1986)].

Dessa definição conclui-se que a informação contida no campo da imagem está sendo considerada como o valor médio do pixel. O "speckle" pode ser interpretado como a variação em torno da média. Assim sendo, quanto maior a relação sinal ruído menor será a influência do "speckle".

Para a imagem-"speckle" amplitude de N visadas, que considera as imagens decorrelacionadas, a relação sinal ruído para qualquer pixel (m,n) depende somente do número de visadas N .

$$\left(\frac{s}{n}\right) = \frac{\left(E[F_{A_{m,n}}]\right)^2}{VAR[F_{A_{m,n}}]} = \frac{\pi}{4 - \pi} N \quad (3.18)$$

Para um campo ou uma imagem-"speckle", onde a função $\tilde{a}_{k,i}^{(v)}$ independe da visada e é localmente invariante conforme (3.13), pode-se estimar o valor médio e a variância do campo da imagem utilizando-se um conjunto de pixels e calcular-se o número equivalente de visadas N através de (3.18).

O número equivalente de visadas pode ser utilizado para a validação da hipótese que assume que o "speckle" tem densidade de probabilidade Rayleigh nas imagens amplitude ou Exponencial nas imagens intensidade. Também pode ser um parâmetro de desempenho, para a comparação entre filtros supressores de "speckle", [Mascarenhas et al. (1991)].

4. Avaliação experimental.

Gerou-se uma imagem-"speckle" amplitude SAR de 8 visadas, utilizando-se a expressão (3.8), considerando-se $a_{m,n}$ constante para qualquer (m,n).

A imagem simulada representa um campo de uma cena localizada a 2,0 km do sistema imageador SAR. A imagem foi gerada com resolução radial de 3,0m e espaçamento radial entre pixels equivalente a 1,5m. A resolução azimutal foi aproximadamente 5,5m e o espaçamento azimutal entre pixels equivalente a 1,18m. A resolução radial e azimutal são definidas respecti-

vamente pela abertura radial e azimutal da Função Espalhamento Pontual, [Fernandes et al. (1992)].

A Função Espalhamento Pontual utilizada levou em conta as características do sistema imageador aero transportado E-SAR/DLR e as peculiaridades do processamento utilizados pelo INPE na formação de imagens, as quais foram descritas por Fernandes, Mascarenhas e Sakane, [1992]. Convém frisar que as visadas consecutivas utilizaram funções de referência azimutal com 50% de superposição. Este fato faz com que as imagens não sejam totalmente descorrelacionadas.

Para se efetuar a comparação entre a imagem-"speckle" simulada e imagens reais, selecionaram-se três campos de uma imagem amplitude de 8 visadas formada no INPE, com dados do E-SAR. Essas regiões foram:

1. Um gramado na lateral da pista de pouso de aeronaves do DLR/Alemanha.
2. Duas áreas de cultivo diferentes nas proximidades do DLR/Alemanha.

A tabela 4.1 mostra algumas características dos campos: Grama, Cultivo 1 e Cultivo 2 é da imagem simulada.

TABELA 4.1

	média	desvio padrão	pixels: Azim.x Rad.
Simulação	481,3	89,9	50x50
Grama	2465,8	515,7	100x100
Cultivo 1	4122,8	840,9	80x80
Cultivo 2	2538,9	541,1	108x80

O valor teórico da relação sinal ruído, calculada através de (3.18) com $N = 8$, resulta em: $(s/n) \cong 29,3$ quando as N imagens são descorrelacionadas.

Estimando-se a relação sinal ruído para os campos Grama, Cultivo 1, Cultivo 2 e para a imagem-"speckle" simulada, através do dados da tabela 4.1 obtém-se:

Tabela 4.2

Campo:	(s/n):
Imagem simulada:	28,7
Cultivo 1:	25,3
Cultivo 2:	22,0
Grama:	22,9

A diferença entre o valor teórico 29,3 e os valores estimados para os campos da imagem real e para a imagem-"speckle" simulada, deve-se aos seguintes fatos:

1. As oito imagens, que formam a imagem amplitude não são descorrelacionadas devido à superposição das funções de referência

azimutal. Isso acarreta uma diminuição na relação sinal/ruído.

2. No processamento realizado pelo INPE e reproduzido na simulação da imagem-"speckle", após a média das 8 imagens foi realizada uma filtragem passa baixas no sentido azimutal (média de quatro amostras consecutivas e reamostragem a cada quatro amostras). Isso acarreta um pequeno aumento na relação sinal/ruído devido à alta correlação entre as amostras em azimute.
3. A presença de ruído térmico nos campos da imagem real.
4. A não estacionariedade espacial dos campos da imagem real.

A relação sinal/ruído para os campos Cultivo 2 e Grama é praticamente a mesma. A diferença entre os valores da relação sinal/ruído dos campos Cultivo 2 e Grama em relação ao campo Cultivo 1, pode ser devido a não linearidade do sistema radar em relação ao valor médio do sinal eco. Nota-se que o campo Cultivo 2 e Grama possuem aproximadamente o mesmo valor médio. Essa hipótese é reforçada pela análise de outras regiões (água de um lago e pista de pouso).

A diferença entre a relação sinal/ruído da imagem simulada somente com "speckle" e a relação sinal/ruído dos campos da imagem real também pode ser devido aos fatos descritos anteriormente.

As figuras 4.1, 4.2 e 4.3 mostram a comparação entre o histograma cumulativo calculado para os campos em estudo. Assim como o histograma pode ser associado à função densidade de probabilidade, o histograma cumulativo pode ser associado à função distribuição.

Para se efetuar a comparação, compatibilizou-se a imagem-"speckle" simulada com cada um dos campos Cultivo 1, Cultivo 2 e Grama. A compatibilização consiste em fazer com que a imagem-"speckle" simulada fique com a mesma variância e a mesma média do campo de interesse. Isso pode ser feito através de uma constante multiplicativa (ganho) e de uma constante aditiva (nível médio) aplicadas a imagem-"speckle" simulada. O ganho e o nível médio para cada campo são facilmente calculados através dos dados da Tabela 4.1.

A análise das figuras 4.1, 4.2 e 4.3 mostra que não houve grandes discrepâncias entre os histogramas cumulativos da imagem-"speckle" simulada compatibilizada e dos campos Cultivo 1, Cultivo 2 e Grama.

O erro quadrático médio relativo ao ajuste dos histogramas cumulativos da imagem-"speckle" simulada compatibilizada e dos campos reais foi aproximadamente:

$6,69 \times 10^{-5}$ para os histogramas cumulativos Cultivo 1 e simulação, $2,81 \times 10^{-5}$ para os histogramas cumulativos Cultivo 2 e simulação e $4,78 \times 10^{-5}$ para os histogramas cumulativos Grama e simulação.

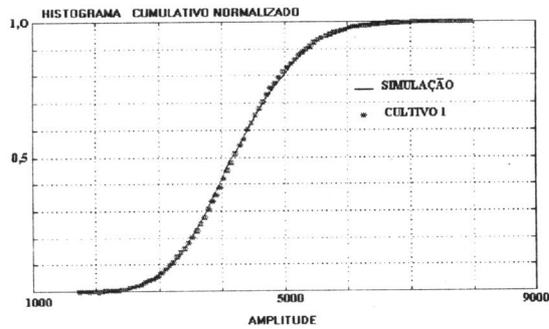


Figura 4.1 Histograma cumulativo do campo Cultivo 1 e simulação.

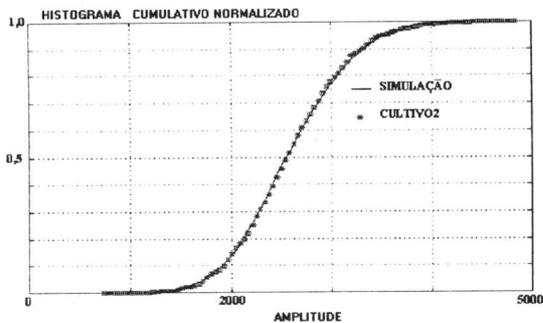


Figura 4.2 Histograma cumulativo do campo Cultivo 2 e da simulação.

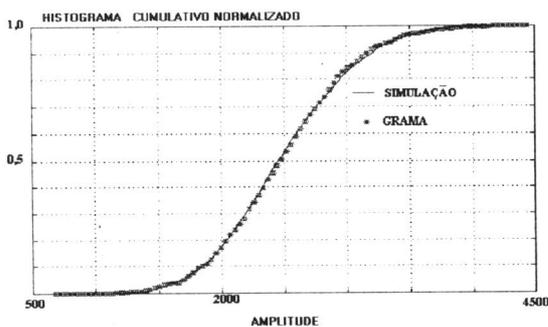


Figura 4.3 Histograma cumulativo do campo Grama e simulação.

Os histogramas cumulativos das Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 são aproximadamente os histogramas cumulativos de uma função gaussiana. Isso se deve ao fato de que a densidade de probabilidade de uma imagem amplitude SAR N visadas, é a convolução entre N densidades de

probabilidade Rayleigh. Essa operação, qualquer que seja a distribuição, tende assintoticamente com o aumento de N para uma densidade de probabilidade gaussiana, [Papoulis (1984)].

Ainda para se comparar a imagem-"speckle" simulada (sem a compatibilização) com os campos Cultivo 1, Cultivo 2 e Grama, calculou-se a função autocovariância normalizada para esses campos, considerados processos ergódicos. As figuras 4.4, 4.5 e 4.6 mostram essa comparação.

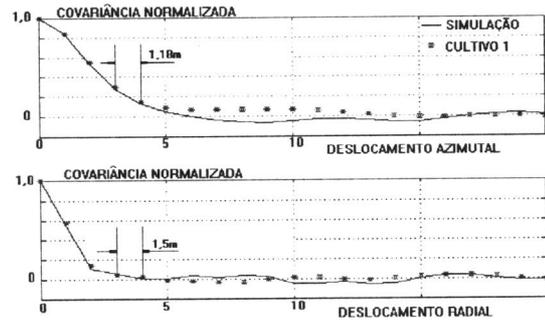


Figura 4.4 Função autocovariância normalizada da simulação e campo Cultivo 1.

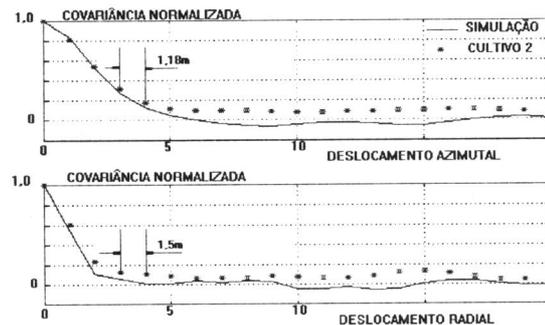


Figura 4.5 Função autocovariância normalizada da simulação e campo Cultivo 2.

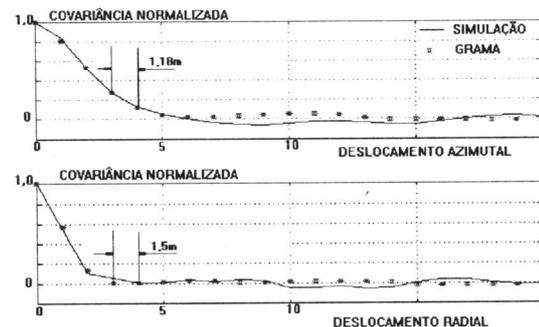


Figura 4.6 Função autocovariância normalizada da simulação e campo Grama.

A função de autocovariância relativa à imagem-"speckle" simulada, apresenta um auto grau de concor-

dância com as funções de autocovariância relativas aos campos Cultivo 1 e a Grama, conforme é mostrado nas Figuras 4.4 e 4.6.

Para o caso do campo Cultivo 2, mostrado na Figura 4.5, houve uma pequena discrepância no sentido do deslocamento radial. Esse fato pode indicar que a imagem Cultivo 2 não é formada apenas pelo "speckle".

Da comparação realizada entre o modelo matemático de "speckle", fundamentado na Seção 3, e dados reais de uma imagem SAR pode-se concluir que:

1. O modelo de imagem-"speckle" amplitude é uma representação válida de certos tipos de campos, encontrados em imagens SAR.
2. Essa representação matemática de um campo apresenta concordância na forma da função distribuição de um pixel, e na função de autocovariância entre pixels da imagem.

Da análise experimental dos dados do sistema imageador E-SAR/DLR, pode-se concluir que: Campos representativos de regiões diferentes de uma cena, tais como os campos Cultivo 1, Cultivo 2 e Grama analisados nessa Seção são formados basicamente por "speckle".

Esse fato, se deve às características de frequência e polarização da onda eletromagnética incidente na cena, características essas que influem no poder de penetração da onda na cena. Desse modo, dependendo da frequência e da polarização da onda incidente, uma floresta pode gerar um campo que contenha somente "speckle" (reflexão na copa das árvores) ou um campo mais complexo (reflexão na copa, tronco, galhos e no solo), [Ulaby - Elachi (1990)].

5. Conclusões.

Caracterizou-se o "speckle" nas imagens SAR. Foi proposto um modelo para o mecanismo de geração do "speckle", a partir da densidade de refletividade de uma cena e da Função Espalhamento Pontual do SAR.

Basicamente o "speckle" foi modelado pela combinação linear, ponderada pela Função Espalhamento Pontual do SAR, de refletores elementares independentes que possuem uma densidade de refletividade caracterizada por uma variável aleatória complexa gaussiana de média zero.

Definiu-se o conceito de imagem-"speckle" e imagem-"speckle" normalizada, como uma estrutura básica das imagens SAR.

Fez-se a avaliação do modelo teórico imagem-"speckle" amplitude, utilizando-se dados do E-SAR, obtendo-se resultados que atestaram a validade do modelo proposto na representação de certos campos de uma imagem.

Com o modelo descrito nesse trabalho é possível simular, para um Sistema SAR, imagens de cenas particulares. Essas imagens podem ser utilizadas, por exemplo, no teste de desempenho de filtros supressores de "speckle".

6. Agradecimentos.

Os autores agradecem ao pesquisador J. C. Mura do DPI/INPE pela geração das imagens E-SAR/DLR ao Dr. J. Moreira, do DLR/Alemanha pelo envio de dados brutos do sistema E-SAR/DLR. Ao Prof. F. Walter do ITA, coordenador do Projeto PNUD/OACI, Objetivo 6, BRA-092/006 pelo suporte material para a realização desse trabalho. À FAPESP pelo apoio ao INPE, Processo 91/3532-2, na realização desse trabalho.

7. Referências Bibliográficas.

- H. H. ARSENAULT and G. APRIL, Properties of speckle integrated with a finite aperture and logarithmically transformed. *J. Opt. Soc. Am.*, V. 66, n. 11 (1976) 1160-1163.
- R. A. BROOKS and A. C. BOVIK, Robust techniques for edge detection in multiplicative Weibull image noise. *Pattern Recognition*. V. 23, n. 10 (1990) 1047-1057.
- D. FERNANDES, N. D. A. MASCARENHAS e F. T. SAKANE, Função espalhamento pontual em imagens de um radar de abertura sintética. *SIBGRAPI V* (1992) 47-54.
- V. S. FROST et al., A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. V. PAMI-4, n. 2 (1982) 157-166.
- J. W. GOODMAN, Some fundamental properties of speckle. *J. Opt. Soc. Am.*, V. 66, n. 11 (1976) 1145-1150.
- J. S. LEE, Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar. *Optical Engineering*. V. 25, n. 5 (1986) 636-643.
- J. S. LEE, Statistical modeling and suppression of speckle in synthetic aperture radar images. *Proceedings of IGARSS'87 Symposium*. Ann Arbor, 18-21 may, (1987) 1331-1339.
- C. LI, Two adaptive filters for speckle reduction in SAR images by using the variance ratio. *Int. J. Remote*, V.9, n.4 (1988) 641-653.
- N. D. A. MASCARENHAS et al., A comparative study of speckle reduction filters in SAR images and their application for classification performance. *24th International Symposium on Remote Sensing of Environmental*, Rio de Janeiro (1991)

- A. PAPOULIS, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. Singapore, McGraw-Hill (1984).
- T. F. ULABY and C. ELACHI ed., *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*. Artech House (1990).
- T. F. ULABY et al., *Microwave Remote Sensing Active and Passive*. Vol. III. Adison-Wesley (1986).
- L. VAN TREES, *Detection, Estimation and Modulation Theory*. Part III, New York, John Wiley (1971).

Apêndice A.

Consideremos que o sinal transmitido por um radar é uma portadora complexa dada por $\exp(j\omega t)$. Supondo a existência de um único alvo, que apesar de pontual possui inúmeras faces de reflexão, o sinal eco relativo a esse alvo será dado por, [Van Trees (1971)]:

$$g(t) = \text{Re} \left\{ \sum_i b_i \exp[j\omega(t - \tau) + \gamma_i] \right\} \quad (\text{a.1})$$

onde: $\text{Re}\{\cdot\}$ é a parte real de $\{\cdot\}$, τ é o atraso relativo à distância do alvo pontual ao radar. b_i e γ_i representam respectivamente a amplitude e a fase impostas à portadora pela i -ésima face do alvo pontual.

A envoltória complexa da expressão (a.1) é dada por:

$$\tilde{g} = \tilde{c} \exp[-j\omega\tau] \quad (\text{a.2})$$

onde a refletividade complexa \tilde{c} é dada por:

$$\tilde{c} = \sum_i b_i \exp[\gamma_i] \quad (\text{a.3})$$

Consideremos as seguintes hipóteses:

1. b_i e γ_i são variáveis aleatórias decorrelacionadas.
2. a densidade de probabilidade de γ_i é uniformemente distribuída entre $[-\pi, \pi]$.
3. não existem refletores preponderantes, ou seja, valores de b_i dominantes.
4. existe um grande número de faces refletoras no alvo pontual.

Com essas hipóteses, prova-se, através do Teorema do Limite Central, que \tilde{c} é uma variável aleatória complexa gaussiana de média zero, [Van Trees (1971)].

Essas hipóteses são utilizadas na caracterização do "speckle", [Goodman (1976)], [Ulaby et al. (1982)].

Apêndice B.

Apresenta-se neste apêndice o desenvolvimento do conceito de imagem-"speckle" complexa e intensidade.

B.1 Imagem complexa.

A imagem-"speckle" complexa normalizada de uma única visada será representada por:

$$\tilde{f}_{c_{m,n}}^{(v)} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \tilde{b}_{c_{kj}}^{(v)} \tilde{f}_{p_{m-k,n-i}}^{(v)} \quad (\text{b.1})$$

Pela definição de imagem-"speckle" complexa tem-se que a densidade de refletividade $\tilde{b}_{c_{kj}}^{(v)}$ é uma variável aleatória complexa gaussiana de média zero e variância tal, que a variância das componentes real e imaginária de $\tilde{f}_{c_{m,n}}^{(v)}$ são unitárias.

Como $\tilde{b}_{c_{kj}}^{(v)}$ é uma variável aleatória complexa gaussiana de média zero e (b.1) é uma combinação linear dessas variáveis, $\tilde{f}_{c_{m,n}}^{(v)}$ também é uma variável aleatória complexa gaussiana de média zero, [Papoulis (1984)].

A imagem-"speckle" complexa de N visadas será definida por:

$$\tilde{F}_{m,n} = \tilde{A}_{m,n} \tilde{F}_{C_{m,n}} \quad (\text{b.2})$$

onde:

$$\tilde{A}_{m,n} = \frac{\tilde{a}_{m,n}}{\sqrt{N}} \quad (\text{b.3})$$

$$\tilde{F}_{C_{m,n}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{v=1}^N \tilde{f}_{c_{m,n}}^{(v)} \quad (\text{b.4})$$

$\tilde{F}_{C_{m,n}}$ representa a imagem-"speckle" complexa normalizada de N visadas. Como é uma combinação linear de $\tilde{f}_{c_{m,n}}^{(v)}$, é uma variável aleatória complexa gaussiana de média nula. Além disso, as variâncias das suas componentes real e imaginária são unitárias.

Comparando-se (b.2) com (3.1) e tendo-se em conta (b.1), (b.3), (b.4) e (2.3), conclui-se que a imagem-"speckle" complexa tem densidade de refletividade dada por:

$$\tilde{b}_{k,i}^{(v)} = \tilde{b}_{c_{kj}}^{(v)} \quad (\text{b.5})$$

e que a função $\tilde{a}_{k,i}^{(v)}$ é independente da visada (v) e localmente invariante, ou seja, constante dentro dos limites de uma célula de resolução:

$$\tilde{a}_{k,i}^{(v)} = \tilde{a}_{m,n} \quad (k,i) \in CR[(m,n)] \quad (\text{b.6})$$

onde $CR[(m,n)]$ significa "célula de resolução centrada em (x_m, y_n) ".

Como $\tilde{F}_{m,n}$ representa a imagem-"speckle" complexa, tem a mesma função distribuição de $\tilde{F}_{C,m,n}$.

Admitindo-se que as componentes em fase e quadratura de um pixel, de um campo da imagem-"speckle" complexa de N visadas possuem o mesmo desvio padrão σ , esse campo da imagem pode ser representado por (b.2), com:

$$\tilde{A}_{m,n} = \sigma \tag{b.7}$$

Deste modo, a função $\tilde{A}_{m,n}$ contém informações sobre o campo da imagem-"speckle" complexa de N visadas.

B.2 Imagem intensidade.

A imagem-"speckle" intensidade normalizada de uma única visada será representada por:

$$f_{i,m,n}^{(v)} = |\tilde{f}_{i,m,n}^{(v)}|^2 \tag{b.8}$$

onde:

$$\tilde{f}_{i,m,n}^{(v)} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \tilde{b}_{i_{kj}}^{(v)} \tilde{f}_{p_m-k-n-i}^{(v)} \tag{b.9}$$

Pela definição de imagem-"speckle" intensidade normalizada a densidade de refletividade $\tilde{b}_{i_{kj}}^{(v)}$ é uma variável aleatória complexa gaussiana de média zero e variância tal, que a média de $f_{i,m,n}^{(v)}$ é unitária.

Como $\tilde{b}_{i_{kj}}^{(v)}$ é uma variável aleatória complexa gaussiana de média zero $f_{i_{kj}}^{(v)}$ é uma variável aleatória com densidade de probabilidade Exponencial, [Papoulis (1984)]. A densidade de probabilidade Exponencial com parâmetro β é dada por:

$$p(f_{i,m,n}^{(v)}) = \frac{1}{2\beta^2} \exp\left\{-\frac{f_{i,m,n}^{(v)}}{2\beta^2}\right\} \tag{b.10}$$

A imagem-"speckle" intensidade de N visadas será definida por

$$F_{I,m,n} = A_{m,n} F_{i,m,n} \tag{b.11}$$

onde:

$$A_{m,n} = |\tilde{a}_{m,n}|^2 \tag{b.12}$$

$$F_{i,m,n} = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^N f_{i,m,n}^{(v)} \tag{b.13}$$

$F_{i,m,n}$ representa a imagem-"speckle" intensidade normalizada de N visadas. Como é a média de variáveis

aleatórias decorrelacionadas com densidade de probabilidade Exponencial, $F_{i,m,n}$ tem densidade de probabilidade Gamma.

Como $f_{i,m,n}^{(v)}$ tem média unitária a média de $F_{i,m,n}$ também é unitária:

$$E[F_{i,m,n}] = 1 \tag{b.14}$$

Comparando-se (b.11) com (3.3) e tendo-se em conta (b.8), (b.9), (b.12), (b.13), e (2.3), conclui-se que a imagem-"speckle" intensidade tem densidade de refletividade:

$$\tilde{b}_{k,i}^{(v)} = \tilde{b}_{i_{kj}}^{(v)} \tag{b.15}$$

função $\tilde{a}_{k,i}^{(v)}$ independente da visada (v) e localmente invariante, conforme (b.6).

Como $F_{I,m,n}$ representa a imagem-"speckle" intensidade, tem a função distribuição de $F_{I,m,n}$.

Para o caso de N visadas independentes, considerando-se que cada uma das visadas possui a distribuição Exponencial dada por (b.10), a densidade de probabilidade de $F_{I,m,n}$ será uma Gamma com parâmetros ρ e ϑ , os quais são função de N e β .

$$p(F_{I,m,n}) = \frac{\rho^\vartheta}{(\vartheta-1)!} (F_{I,m,n})^{(\vartheta-1)} \exp\{-\rho F_{I,m,n}\} \tag{b.16}$$

$$\rho = \frac{N}{2\beta^2} \tag{b.17}$$

$$\vartheta = N \tag{b.18}$$

A média e variância de $F_{I,m,n}$ são dadas respectivamente por:

$$E[F_{I,m,n}] = \frac{\vartheta}{\rho} = 2\sigma \tag{b.19}$$

$$VAR[F_{I,m,n}] = \frac{\vartheta}{\rho^2} = \frac{4\sigma^2}{N} \tag{b.20}$$

Desta forma um campo de uma imagem-"speckle" intensidade com N visadas pode ser representado por (b.11) com:

$$A_{m,n} = E[F_{I,m,n}] \tag{b.21}$$

Novamente, nota-se que a função $A_{m,n}$ contém a informação sobre o campo da imagem-"speckle".

