

Potencialidades de um modelo eletromagnético em sensoriamento remoto por microondas

Sidnei João Siqueira Sant'Anna^{1,2}
José Carlos da Silva Lacava²
David Fernandes²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
sidnei@dpi.inpe.br

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 - CEP 12228-900 - São José dos Campos - SP, Brasil
{lacava, david}@ita.br

Abstract. An electromagnetic model for microwave remote sensing purposes is presented. Its applicability is demonstrated by two examples: an electromagnetic characterization of simple targets and a polarimetric SAR simulation. In the former, the scattering matrix and radar cross section are used to characterize dipoles embedded in multilayer planar structures. In the later, it is shown how the model can be applied to the simulation of several SAR images using different frequencies. These images can be composed by different regions, which are characterized by their electric properties. Polarimetric attributes can also be extracted from these images enabling the analysis of some typical polarimetric remote sensing problems.

Palavras-chave: electromagnetic modeling, target characterization, SAR image simulation, modelagem eletromagnética, caracterização de alvos, simulação de imagens SAR.

1. Introdução

O sensoriamento remoto de alvos na superfície terrestre, na faixa de microondas, ganhou grande impulso com o desenvolvimento e uso dos radares de abertura sintética polarimétricos (PolSAR - *Polarimetric Synthetic Aperture Radar*). Com as imagens polarimétricas crescem as possibilidades de extração de mais informação relativa aos parâmetros geofísicos dos alvos naturais devido à diversidade de polarização presente em um PolSAR.

No desenvolvimento de técnicas para a extração de informação de imagens, geralmente, se adotam modelos matemáticos para caracterizar os elementos que as compõem. No caso de imagens SAR os modelos matemáticos mais utilizados são de origem estocástica ou eletromagnética. O primeiro é mais amplamente difundido e considerado nas pesquisas que envolvem processamento de imagens SAR, enquanto que a segunda abordagem de modelagem (de natureza eletromagnética) vem, mais recentemente, sendo usada para tal finalidade.

Na modelagem eletromagnética procura-se quantizar o retroespalhamento dos mais variados elementos espalhadores que podem compor uma cena. Nesta modelagem leva-se em conta a forma do elemento espalhador, as suas propriedades elétricas e as características da onda eletromagnética incidente (frequência, polarização e ângulo de incidência). Sendo o processo de interação da energia eletromagnética com os alvos na superfície terrestre o foco de atenção de estudos para a modelagem do retroespalhamento dos alvos. Um melhor entendimento do processo de interação da energia eletromagnética com os alvos da superfície terrestre pode ajudar e/ou facilitar a interpretação e análise de dados de radar.

Tendo, então, a modelagem eletromagnética como principal foco, o objetivo deste trabalho é mostrar a potencialidade de um modelo eletromagnético desenvolvido. Este modelo pode ser de grande utilidade para a comunidade científica no tocante aos estudos de sensoriamento remoto por microondas. A modelagem eletromagnética adotada é descrita de maneira simplificada na Seção 2. A aplicabilidade e a utilidade desta modelagem são exemplificadas nas Seções 3 e 4 através da caracterização de alvos simples e da simulação de imagens SAR polarimétricas em uma visada, respectivamente. Finalmente, as conclusões relativas aos resultados são expostas na Seção 5.

2. Modelo Eletromagnético

O problema da modelagem eletromagnética é abordado utilizando-se a técnica de onda completa no domínio espectral. Esta técnica é, usualmente, empregada nos trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Antenas e Propagação (LAP) do Instituto Tecnológico de Aeronáutica na área de projetos e análise de antenas de microfita planas e com múltiplas camadas. No entanto, esta técnica foi adaptada ao caso em que a estrutura é excitada através de ondas planas e uniformes (Pereira, 2005).

A estrutura modelada eletromagneticamente é composta por $N+2$ camadas dielétricas lineares, homogêneas e isotrópicas superpostas na direção do eixo z de um sistema de coordenadas retangulares. As camadas são também supostas ilimitadas ao longo das direções dos eixos x e y , como mostrado na Figura 1. A camada inferior que ocupa a região negativa de z , é denominada de camada *ground* e possui permissividade elétrica (ϵ_g) e permeabilidade magnética (μ_g) complexas. As N camadas existentes entre o espaço livre e a camada *ground* são denominadas de camadas confinadas e são caracterizadas por espessuras ℓ_n , permissividade elétrica (ϵ_n), permeabilidade magnética (μ_n) complexas, com $1 \leq n \leq N$. A interface $z = d_N$ separa o N -ésima camada da região do espaço livre e tanto esta camada quanto a camada *ground* possuem espessuras ilimitadas. Elementos que suportem corrente elétrica (elemento metálico) ou corrente magnética são impressos nas $N+1$ interfaces entre as camadas. Estes elementos atuarão como os espalhadores da estrutura multicamadas, após uma onda eletromagnética plana e uniforme, elipticamente polarizada e com incidência oblíqua (definida pelos ângulos θ_i e ϕ_i de um sistema de coordenadas esféricas) excitar a estrutura. A onda incidente induzirá densidades superficiais de corrente elétrica ou magnética sobre os elementos espalhadores.

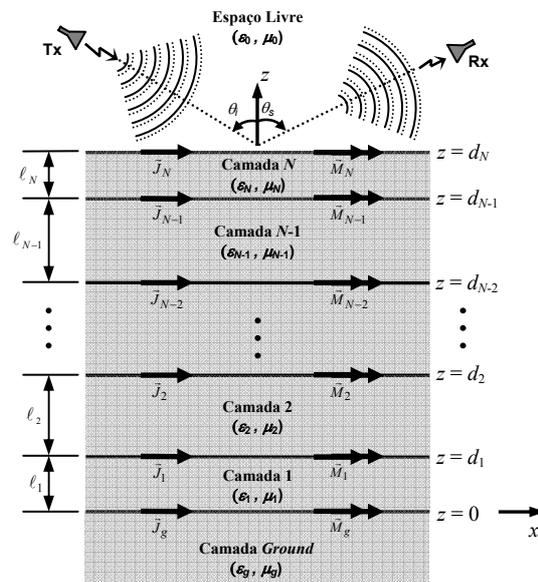


Figura 1. Vista lateral da geometria da estrutura em análise (corte no plano $y = 0$).

O procedimento usado na determinação dos campos eletromagnéticos presentes em uma estrutura planar multicamadas e das respectivas funções de *Green* é descrito resumidamente no fluxograma da Figura 2. Este é o mesmo procedimento adotado em Sant'Anna et al., (2007a, 2007b, 2008a, 2008b e 2008c). O desenvolvimento analítico é baseado no sistema de coordenadas retangulares localizado no topo da camada *ground* (interface $z = 0$). De acordo com esta metodologia a estrutura é tratada como um problema de contorno e as correntes induzidas nos elementos espalhadores serão as fontes virtuais dos campos espalhados. Inicialmente, parte-se das equações de onda para cada camada, no domínio de *Fourier*, das quais se obtém um sistema de equações diferenciais. A partir deste sistema e após a aplicação das condições de contorno apropriadas em cada interface produz-se um sistema linear nas amplitudes dos campos

eletromagnéticos transformados, possuindo $4N+4$ equações e o mesmo número de incógnitas, onde a variável N é igual ao número de camadas confinadas da estrutura. As funções de *Green* espectrais para cada camada são obtidas analiticamente resolvendo-se este sistema linear.

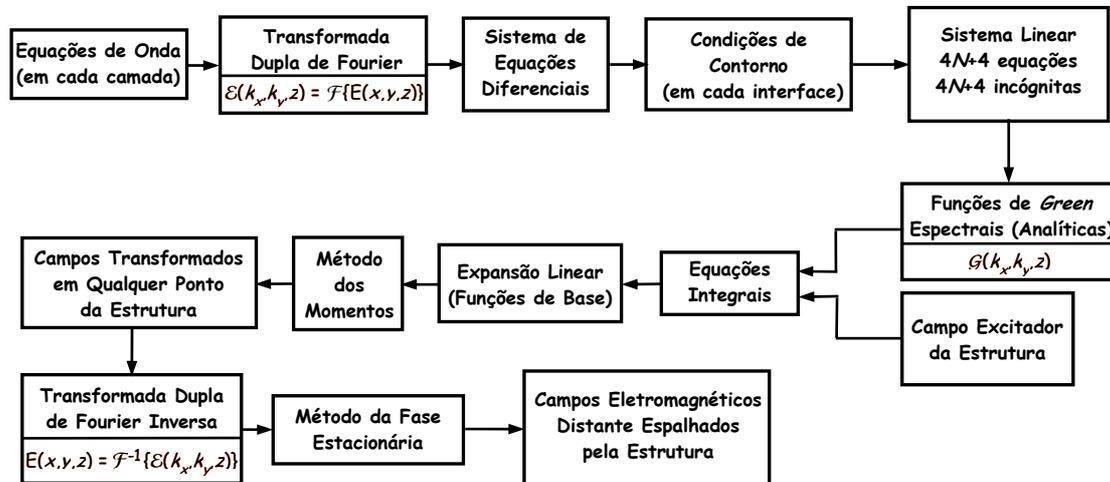


Figura 2. Diagrama de blocos da metodologia.

Através da combinação das funções de *Green* espectrais e do campo excitador da estrutura, o qual está diretamente relacionado aos campos da onda incidente, monta-se um sistema de equações integrais. Neste sistema as incógnitas serão as componentes das densidades superficiais de corrente induzidas sobre os elementos espalhadores. Para resolver o sistema de equações integrais aplica-se o método dos momentos (MoM) no domínio espectral. Primeiramente, expande-se linearmente a densidade superficial de corrente em funções de base, utilizam-se o método de *Galerkin* (onde as funções de teste e de base são definidas iguais) e o teorema de *Parseval*. Neste ponto os campos eletromagnéticos transformados em qualquer ponto da estrutura multicamadas podem ser determinados. Finalmente, os campos eletromagnéticos no domínio espacial são obtidos a partir da transformada inversa dupla de *Fourier*. O método da fase estacionária é usado para se obter expressões assintóticas para os campos eletromagnéticos espalhados pela estrutura.

A determinação dos campos eletromagnéticos presentes na estrutura multicamadas é realizada, neste modelo, a partir da definição dos seguintes parâmetros de entrada: a frequência de operação, as direções de incidência e espalhamento da onda eletromagnética, a polarização e a amplitude da onda incidente na estrutura (onda excitadora), as características elétricas das camadas (permissividade elétrica, permeabilidade magnética e a tangente de perdas), a espessura das camadas confinadas e as dimensões dos elementos espalhadores. A flexibilidade, a tratabilidade e a ampla gama de aplicações deste modelo, o tornam bastante atrativo para a comunidade científica no que tange o estudo do espalhamento eletromagnético de alvos. O potencial deste modelo eletromagnético é, então, demonstrado nas próximas seções através da caracterização eletromagnética de alvos simples e da simulação de imagens SAR polarimétricas, respectivamente.

3. Caracterização Eletromagnética de Alvos

A caracterização eletromagnética de um dado objeto (alvo) é realizada através de medidas ou atributos que descrevam suas propriedades eletromagnéticas. Geralmente, estas medidas são obtidas a campo distante, como é o caso, por exemplo da matriz de espalhamento, da seção reta radar e dos parâmetros entropia, anisotropia e ângulo α derivados da decomposição da matriz de coerência dos alvos (Cloude e Pottier, 1996). Todas estas medidas estão relacionadas ao processo de espalhamento eletromagnético do alvo. O espalhamento provocado por um alvo depende de suas características eletromagnéticas assim como das características do sensor que gerou a onda eletromagnética. Uma vez que no modelo eletromagnético aqui apresentado é possível a determinação dos campos eletromagnéticos distantes espalhados pela estrutura multicamadas e tem-se o controle dos

parâmetros de entrada, pode-se, então, utilizá-lo na caracterização eletromagnética de alvos.

Na matriz de espalhamento as componentes do campo elétrico espalhado são relacionadas às componentes do campo elétrico incidente. A matriz de espalhamento é o parâmetro mais importante na caracterização eletromagnética dos alvos, pois é dela que se origina a maioria dos parâmetros eletromagnéticos que descrevem o alvo. Em Sant’Anna et al., (2008a) são desenvolvidas, a partir do modelo eletromagnético de multicamadas, expressões analíticas para a matriz de espalhamento de um dipolo planar elétrico e de um dipolo planar magnético, ambos inseridos numa estrutura multicamadas. Os elementos destas matrizes de espalhamento são determinados para qualquer direção de espalhamento e incidência. Neste trabalho foram utilizados duas métricas de comparação entre as matrizes de espalhamento: o ângulo α (oriundo da decomposição de alvos proposta por Cloude-Pottier) e o coeficiente de correlação. Embora os dois dipolos tenham natureza eletromagnética diferentes não foi possível distingui-los através do ângulo α , no entanto, com o coeficiente de correlação os dipolos foram diferenciados.

A seção reta radar (*Radar Cross Section – RCS*) que é utilizada na caracterização das propriedades de espalhamento de um alvo, também pode ser obtida através da modelagem eletromagnética aqui apresentada. A *RCS* de um alvo é função da polarização da onda eletromagnética incidente, do ângulo de incidência, do ângulo de observação, da geometria e das propriedades elétricas do alvo e da frequência de operação. Pode-se, desta forma, através do modelo eletromagnético estudar a influência da variação destes parâmetros na *RCS* de um dado alvo, como realizado em Sant’Anna et al. (2007a e 2008b). Exemplos gráficos da variação da *RCS* em função de alguns destes parâmetros são ilustrados nas Figuras 3-5, onde o cálculo da *RCS* foi realizado na frequência de 1,25 GHz (comprimento de onda $\lambda_0 = 23$ cm). Ondas linearmente polarizadas com amplitude unitária que incidem obliquamente ($\theta_i = 40^\circ$ e $\phi_i = 60^\circ$) na estrutura multicamadas, foram usadas para excitar dipolos elétrico e magnético planares de comprimento 95,83 mm e largura 1,92 mm presentes na estrutura. A *RCS* é obtida para a direção na qual o campo elétrico espalhado pelo dipolo é igual a direção de incidência da onda, ou seja $\theta_s = \theta_i$ e $\phi_s = \phi_i$ (caso monoestático de um radar).

Na Figura 3 são mostradas variações da *RCS* em azimute ($\theta_s = 40^\circ$ e $-180^\circ \leq \phi_s \leq +180^\circ$) de um dipolo elétrico (Figura 3a) e de um dipolo magnético (Figura 3b) localizados na interface $z = d_1$ de uma estrutura com apenas uma camada confinada. Estes gráficos são obtidos quando se varia a espessura (ℓ_1) da camada confinada. Neste caso, as camadas confinada e *ground* são caracterizadas, respectivamente, por $\epsilon_r = 2,33$ e $\tan\delta = 0,12$, $\epsilon_{rg} = 5,0$ e $\tan\delta_g = 0,2$ e pela permeabilidade magnética do espaço livre (μ_0).

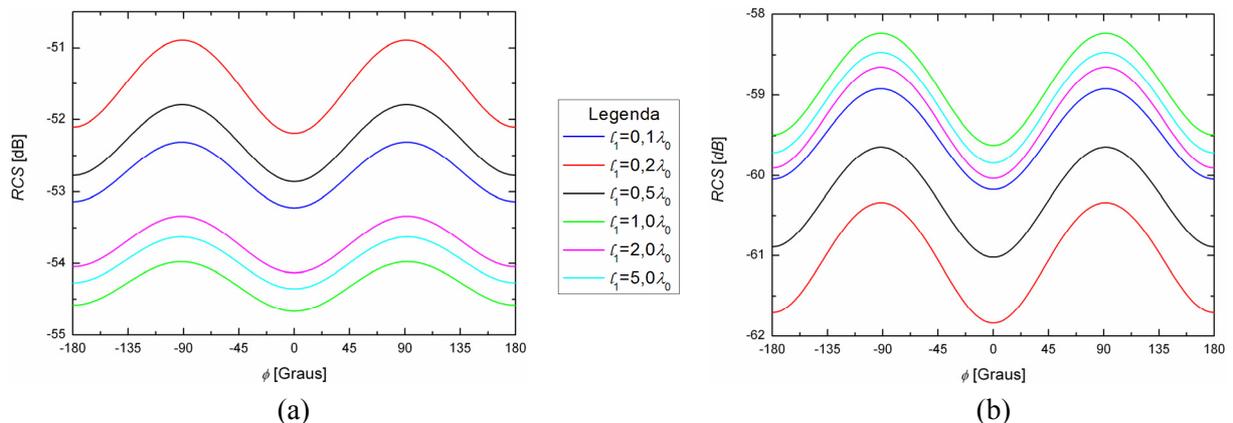


Figura 3. *RCS* em azimute em função de ℓ_1 : (a) dipolo elétrico e (b) dipolo magnético.

As variações da *RCS* em elevação ($-90^\circ \leq \theta_s \leq +90^\circ$ e $\phi_s = 60^\circ$) do dipolo magnético em função da permissividade relativa e da tangente de perdas da camada confinada são ilustradas, respectivamente, nas Figuras 4a e 4b. Os gráficos de *RCS* da Figura 4 são obtidos quando a estrutura é excitada por uma

onda linear horizontalmente polarizada. Na Figura 5 é mostrada a influência da camada *ground* (ϵ_{rg} e $\tan\delta_g$) na RCS em azimute (polarização vertical de incidência) e em elevação (polarização horizontal de incidência) de um dipolo elétrico. Em ambas figuras a espessura da camada confinada é de 50 cm.

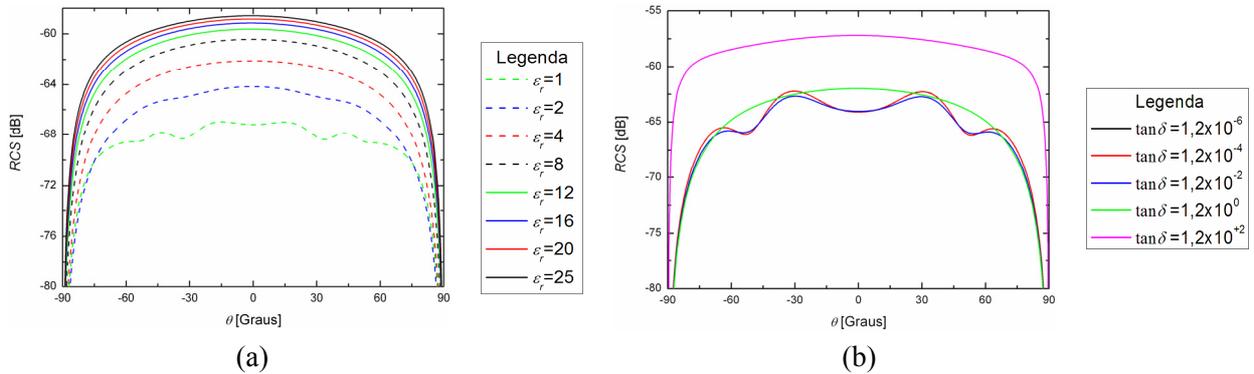


Figura 4. RCS em elevação do dipolo magnético em função: (a) ϵ_r e (b) $\tan\delta$.

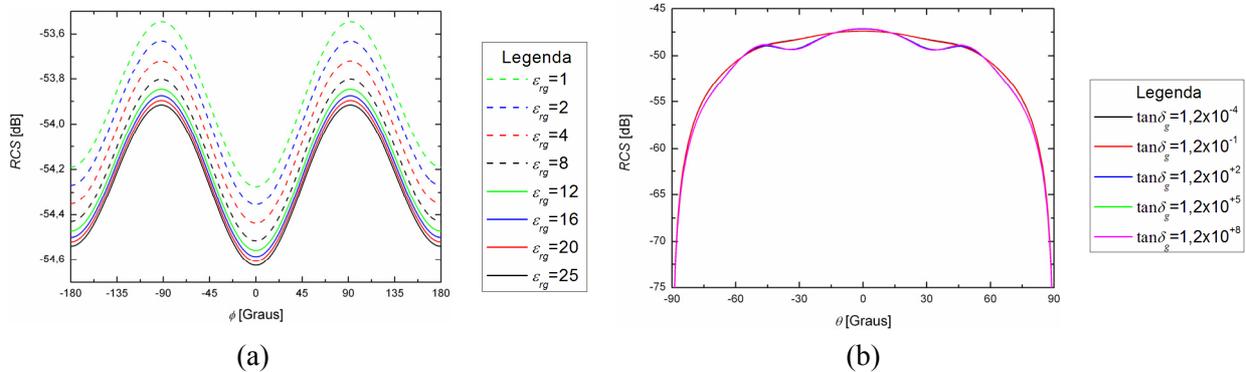


Figura 5. RCS do dipolo elétrico: (a) em azimute e função de ϵ_{rg} e (b) em elevação e função da $\tan\delta_g$.

4. Geração dos Dados SAR

A geração de dados SAR é outro exemplo dentre as possíveis aplicações do modelo eletromagnético apresentado na Seção 2. A metodologia utilizada na simulação de imagens SAR polarimétricas é completamente descrita em Sant'Anna et al. (2008c). Nos dois conjuntos de imagens simuladas subsequentes se utilizaram estruturas multicamadas compostas por três camadas isotrópicas, lineares e homogêneas, ou seja, uma estrutura com uma única camada confinada para gerar imagens polarimétricas complexas de uma visada. Estas imagens possuem resolução espacial de 3 m nas direções de alcance e azimute e espaçamento entre pixels de 2,8 m nas mesmas direções, tendo 35° de ângulo de *grazing* e representam uma área no terreno de 290 m \times 290 m. Dipolos elétricos retangulares de espessura infinitesimais, medindo 50 mm \times 1 mm, são impressos na interface (plano $z = d_1$) entre o espaço livre e a camada confinada. No processo de simulação um grande número de dipolos é distribuído ao longo do plano $z = d_1$, de tal forma que é garantido existir no mínimo 30 elementos espalhadores em cada célula de resolução do SAR. As imagens SAR simuladas representam as imagens de um sensor mono-estático.

O primeiro conjunto de imagens, ilustrado na Figura 6, foi gerado para um SAR operando em banda L (1,25 GHz) e para as seguintes características da estrutura multicamadas: camada *ground* com $\epsilon_{rg} = 5,0$ e $\tan\delta_g = 0,2$, camada confinada com $\ell_1 = 527,63$ mm, $\epsilon_r = 2,33$ e $\tan\delta = 1,2 \times 10^{-4}$ e ambas com permeabilidade magnética μ_0 . Neste conjunto as imagens contêm quatro regiões distintas que são diferenciadas pela orientação local dos dipolos. Os dipolos são orientados preferencialmente a 10° , 30° e 20° , respectivamente, nas regiões superior esquerda, superior direita e inferior direita, enquanto na região inferior esquerda os dipolos têm orientação totalmente aleatória. A orientação dos dipolos é referente à direção de azimute e a origem do sistema de coordenadas está localizada no centro da imagem. As imagens em amplitude dos canais HH, HV e VV são mostradas na Figura 6. O

canal VH não é apresentado nesta figura já que é igual ao canal HV devido à reciprocidade.

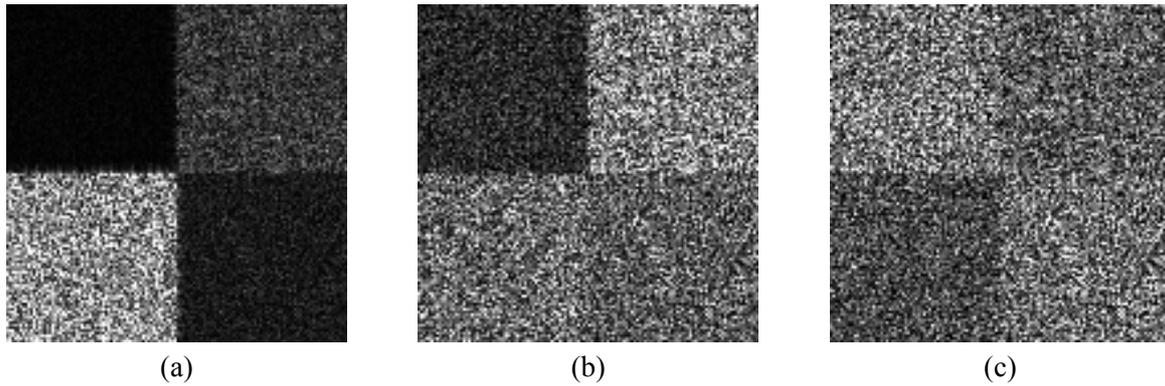


Figura 6. Imagem polarimétrica em amplitude: (a) HH, (b) HV e (c) VV.

Este tipo de imagens pode auxiliar tanto no desenvolvimento de novas ferramentas de processamento de imagens, tais como filtros redutores de *speckle* entre outras, quanto na análise da discriminabilidade de parâmetros polarimétricos extraídos de imagens SAR. Como exemplo, estimou-se pontualmente das imagens polarimétricas os ângulos α e β , ambos provenientes da decomposição em autovalores e autovetores da matriz de coerência do alvo proposta por Cloude e Pottier e o ângulo de orientação φ usando-se a diferença de fase entre as componentes da matriz de polarizações circular direita-direita e esquerda-esquerda (Lee et al., 2000). O ângulo α está relacionado ao mecanismo de espalhamento do alvo, o ângulo β indica a orientação do espalhador em torno da linha de visada do radar e o ângulo φ é o ângulo induzido pela inclinação azimuthal do terreno. As imagens referentes a estes ângulos são mostradas na Figura 7, juntamente com seus respectivos histogramas. Destas imagens observa-se que a separabilidade das regiões é melhor conseguida usando os ângulos β e φ . Verifica-se também que através de um simples procedimento de limiarização dos histogramas pode-se classificar adequadamente as quatro regiões da imagem SAR, isto é distinguir apropriadamente regiões que possuam orientação distintas dos seus espalhadores.

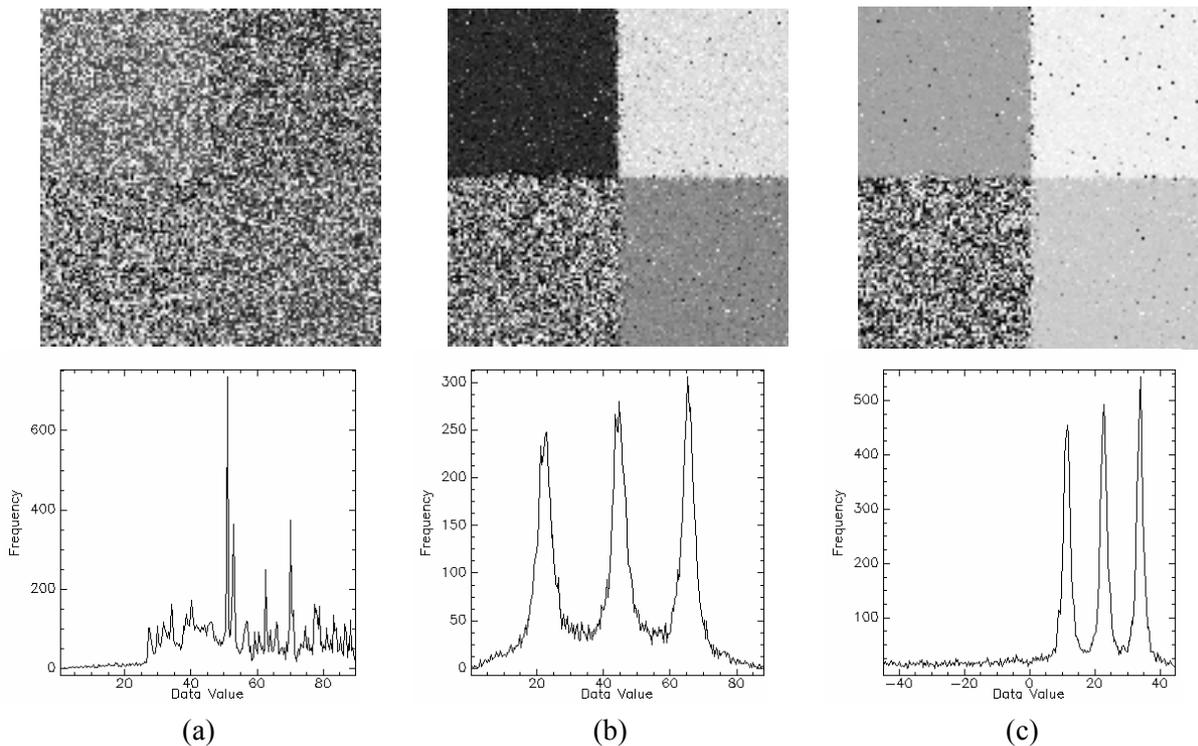


Figura 7. Imagens dos ângulos e seus respectivos histogramas: (a) α , (b) β e (c) φ .

O aumento dos valores de permissividade elétrica e da tangente de perdas das camadas pode significar um aumento do conteúdo hídrico de uma dada região, portanto a partir deste modelo eletromagnético pode-se simular imagens em que regiões distintas sejam caracterizadas por diferentes parâmetros elétricos das camadas. Desta maneira, gerou-se um segundo conjunto de imagens para simular o imageamento de um SAR operando em duas frequências, banda C (5,3 GHz) e banda X (9,6 GHz). Estas imagens contêm cinco regiões diferentes cujas características elétricas das camadas são resumidas na Tabela 1 e a partir das imagens polarimétricas HH e VV calculou-se pontualmente a razão de discriminação de polarização (*PDR*) e a raiz quadrada do descritor polarimétrico (*PDS*). Estes atributos foram propostos, respectivamente, em Singh e Dubey (2007) e Tadono et al. (1999) com o intuito de estimar o conteúdo hídrico de solos a partir de dados SAR. Estes atributos são dados por

$$PDR = \frac{\sigma_{vv}^0 - \sigma_{hh}^0}{\sigma_{vv}^0 + \sigma_{hh}^0}, \quad (1)$$

$$PDS = \sqrt{\sigma_{vv}^0 \sigma_{hh}^0}, \quad (2)$$

onde σ_{pq}^0 representa o coeficiente de retroespalhamento na polarização *pq*. As imagens resultantes dos cálculos de *PDR* e *PDS* são apresentadas nas Figuras 8 e 9, respectivamente, para as imagens em bandas C e X. Nestas figuras também são mostradas as respectivas imagens resultantes da classificação ICM ao se utilizar a distribuição gaussiana bivariada para representar a densidade de probabilidade conjunta dos atributos *PDR* e *PDS*. A partir das imagens classificadas pode-se notar que as cinco regiões presentes nas imagens polarimétricas são completamente distinguíveis. Isto mostra que os dois atributos usados conjuntamente são eficientes em discriminar as regiões das imagens uma vez que a exatidão global de classificação foi de 99,75% para os dados em banda C e de 99,70% para os dados em banda X.

Tabela 1 – Característica elétrica das regiões.

Localização da Região	ϵ_r	$\tan \delta_r$	ϵ_{rg}	$\tan \delta_g$	Orientação dos Dipolos
Superior Esquerda	2,33	$1,2 \times 10^{-4}$	5,0	$2,0 \times 10^{-1}$	10°
Inferior Direita	2,33	$1,2 \times 10^{-4}$	5,0	$2,0 \times 10^{-1}$	30°
Central	2,33	$1,2 \times 10^{-4}$	5,0	$2,0 \times 10^{-1}$	TA ^(a)
Inferior Esquerda	4,00	$1,2 \times 10^{-1}$	8,0	$2,0 \times 10^{-1}$	TA
Superior Direita	2,33	$1,2 \times 10^{-4}$	8,0	$2,0 \times 10^{-1}$	TA

(a) TA significa totalmente aleatório.

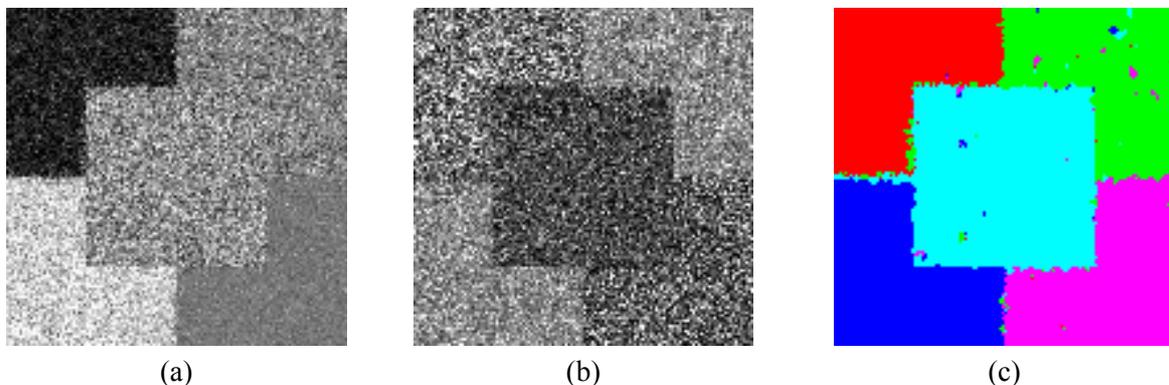


Figura 8. Imagens, na banda C, dos atributos: (a) *PDR*, (b) *PDS* e (c) classificada.

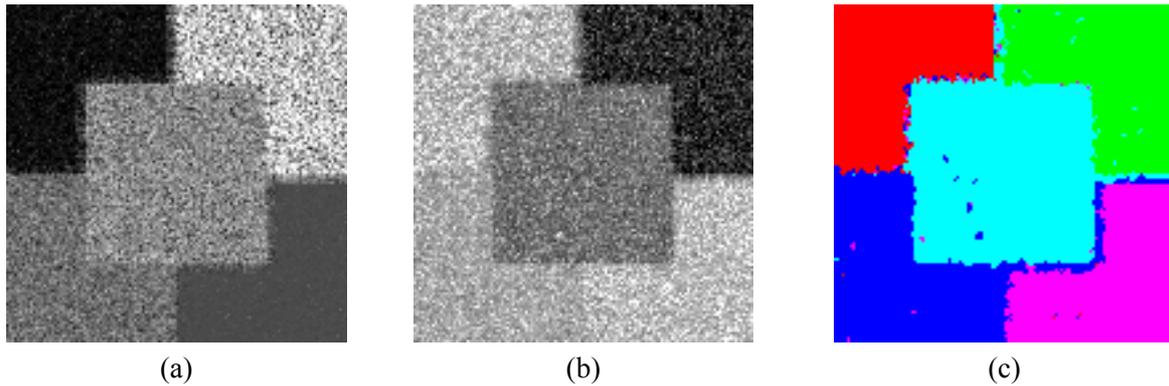


Figura 9. Imagens, na banda X, dos atributos: (a) *PDR*, (b) *PDS* e (c) classificada.

5. Conclusões

Um modelo eletromagnético que leva em conta estruturas com múltiplas camadas é apresentado neste trabalho. A determinação dos campos eletromagnéticos presentes neste tipo de estrutura é descrita de forma sucinta. A potencialidade do modelo eletromagnético é ilustrada através da sua utilização na caracterização eletromagnética de alvos simples e também na simulação de imagens SAR polarimétricas de uma visada. As imagens podem ser geradas em várias frequências de operação, com diferentes resoluções espacial e espaçamento entre pixels, entre outros parâmetros do imageamento SAR. A partir destas imagens, ferramentas específicas para o processamento digital de imagens podem ser desenvolvidas, assim como realizar estudos de calibração de dados SAR.

Referências

- Cloude, S. R.; Pottier, E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. **IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n. 1, p. 498-512, 1996.
- Lee, J. S., D. L. Schuler, and T. L. Ainsworth, Polarimetric SAR data compensation for terrain azimuth slope variation. **IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 5, p. 2153-2163, 2000.
- Pereira, C. G. Análise no domínio espectral de microfitas excitadas por ondas planas. **Tese de Mestrado**. ITA, São José dos Campos, 2005.
- Sant'Anna, S. J. S.; Lacava, J. C. S.; Fernandes, D. Estudo do espalhamento eletromagnético de um alvo simples usando o método dos momentos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR'2007). **Anais**. Florianópolis, Brasil, 2007a.
- Sant'Anna, S. J. S.; Lacava, J. C. S.; Fernandes, D. Closed form expressions for scattering matrix of simple targets in multilayer structures. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'2007). **Proceedings**. Barcelona, Spain, 2007b.
- Sant'Anna, S. J. S.; Lacava, J. C. S.; Fernandes, D. Evaluation of the scattering matrix of flat dipoles embedded in multilayer structures. **PIERS Online**, Vol. 4, No. 5, 536-540, 2008a.
- Sant'Anna, S. J. S.; Lacava, J. C. S.; Fernandes, D. Polarimetric characterization of magnetic flat dipole embedded in multilayer structures. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'2008). **Proceedings**. Boston, United State, 2008b.
- Sant'Anna, S. J. S.; Lacava, J. C. S.; Fernandes, D. From Maxwell's equations to polarimetric SAR images: a simulation approach. A ser publicado em **Sensor Journal**, 2008c.
- Singh, D.; Dubey V. Microwave bistatic polarization measurements for retrieval of soil moisture using an incident angle approach, **J. Geophys. Eng.**, n. 4, p. 75-82, 2007.
- Tadono, T.; Qong, M.; Wakabayashi, H.; Shimada, M.; Kobayashi, T.; Shi, J. Preliminary studies for estimating surface soil moisture and roughness based on a simultaneous experiment with CRL/NASDA airborne SAR (PI-SAR), In: *Asian Conference on Remote Sensing 1999*.