

Estudo do espalhamento eletromagnético de um alvo planar simples usando o Método dos Momentos

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. The scattering of a planar dipole was studied. In order to obtain the electric field scattered by dipole the method of moments in spectral domain was applied. The dipole scattering was characterized by the radar cross section (RCS), the polarimetric response and the α -angle from Cloude's target decomposition theorem. The results point out that α -angle is the most sensible parameter to variations on incident angles. The RCS is influenced by the incident angles and by the geometrical dipole area. The curves of RCS show the same pattern, however their magnitude values are different. The incident angles have also influence over polarimetric response, showing its use and interpretation must be done with extremely care.

Palavras-chave: scattering, polarimetric response, RCS, espalhamento eletromagnético, resposta polarimétrica.

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. Por conseguinte, com dados polarimétricos aumenta-se também a capacidade discriminatória dos alvos na superfície terrestre quando comparados àqueles dados de radares que operam com uma única polarização. Portanto, o advento dos radares polarimétricos intensificou os estudos, por parte da comunidade científica, do espalhamento eletromagnético provocado por alvos naturais ou não. Este espalhamento, por sua vez, depende das características geométricas e eletromagnéticas dos alvos, assim como do tipo do sensor que gerou a onda eletromagnética.

A caracterização do espalhamento eletromagnético dos alvos na superfície terrestre pode influenciar inúmeras aplicações práticas no sensoriamento remoto, tais como a classificação de imagens SAR e a calibração do sensor, por exemplo. Portanto, o entendimento dos mecanismos de espalhamento polarimétrico tem sido abordado com certa frequência nos artigos científicos. Os trabalhos de van Zyl et al. (1987), Krogager (1993), Cloude e Pottier (1996), Freeman e Durden (1998), Chiu e Sarabandi (1999) e Franceschetti et al. (2002) são exemplos destas pesquisas.

Vários modelos de espalhamento eletromagnético de alvos têm sido propostos na literatura. Nestes modelos, em geral, alvos complexos tais como floresta, área urbana, entre outros são considerados serem compostos por alvos com geometria mais simples e conhecida (esfera, elipsóide, dipolo, cilindros, etc.), possuindo diferentes tamanhos, orientações, formas e propriedades elétricas. Por exemplo, uma árvore pode ser modelada por um conjunto de cilindros dielétricos representando seu tronco e galhos e discos representando suas folhas.

Desta forma, o estudo das características eletromagnéticas de alvos com estruturas simples é fundamental para o conhecimento e entendimento das características eletromagnéticas de alvos mais complexos.

Neste contexto se insere este trabalho que objetiva estudar as características do espalhamento eletromagnético de um elemento espalhador simples, um dipolo elétrico planar. Inicialmente, são apresentados alguns parâmetros relacionados ao espalhamento eletromagnético que servirão para caracterizar o elemento espalhador (Seção 2). Na Seção 3 é descrito, de forma sucinta, o procedimento geral para o cálculo dos campos eletromagnéticos em estruturas contendo múltiplas camadas isotrópicas ou não, que tenham como fonte a densidade superficial de corrente elétrica sobre o elemento espalhador. A análise dos resultados é apresentada na Seção 4 e finalmente são expostas as conclusões a cerca dos resultados obtidos.

2. Parâmetros do Espalhamento

O processo de espalhamento de uma onda eletromagnética provocado por um alvo pode ser modelado como uma transformação linear entre os campos espalhado (\vec{E}^s) e incidente (\vec{E}^i). As componentes do campo elétrico espalhados podem ser relacionadas às componentes do elétrico incidente através de uma matriz de elementos complexos, denominada de matriz de espalhamento [S]:

$$\begin{bmatrix} \vec{E}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_v^s \\ E_h^s \end{bmatrix} = \frac{e^{-ik_0r}}{r} \begin{bmatrix} S_{vv} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{hh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_v^i \\ E_h^i \end{bmatrix} = \frac{e^{-ik_0r}}{r} [S] \begin{bmatrix} \vec{E}^i \end{bmatrix}.$$

Desta forma, um objeto (alvo) pode ser eletromagneticamente caracterizado através da sua matriz de espalhamento [S] desde que as amplitudes e as fases dos seus elementos que a compoñham sejam conhecidas. Por exemplo, para um dipolo filamental localizado no plano x - y de um sistema de coordenadas retangulares, cujo eixo longitudinal possua uma inclinação β com relação ao eixo x , Long, (2001) descreveu a matriz de espalhamento do dipolo em função de β . A matriz de espalhamento para este dipolo é dada por:

$$[S] = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & \text{sen} \beta \cos \beta \\ \text{sen} \beta \cos \beta & \text{sen}^2 \beta \end{bmatrix}.$$

Note que se $\beta = 0^\circ$ ou $\beta = 90^\circ$ não existirá componentes de campo espalhado com polarização cruzada se o campo incidente for linearmente polarizado nas direções x e y , respectivamente. A matriz de espalhamento é o parâmetro mais importante na caracterização eletromagnética dos alvos, pois é dela que se origina a maioria dos parâmetros utilizados nas análises dos dados polarimétricos.

A polarização da onda eletromagnética pode ser um parâmetro usado na discriminação dos alvos uma vez que a polarização na qual o radar recebe a máxima ou a mínima potência espalhada pode ser diferente para diferentes tipos de alvos. O estado de polarização de uma onda eletromagnética plana é determinado pela figura que o campo elétrico descreve temporalmente no plano ortogonal à direção de propagação da onda. O estado de polarização mais geral é o elíptico, ou seja, a figura descrita pelo campo elétrico é uma elipse e neste caso a onda é dita ser elípticamente polarizada. Este estado pode ser caracterizado pelos ângulos de elipsidade (χ) e de orientação (ψ) da elipse de polarização da onda. A elipsidade varia de -45° até 45° e a orientação de -90° à 90° . Observe que as polarizações lineares ($\chi = 0^\circ$) vertical e horizontal são obtidas quando $\psi = 0^\circ$ e $\psi = 90^\circ$, respectivamente (Ulaby e Elachi, 1990).

A Seção Transversal Radar ou Seção Reta Radar (*Radar Cross Section* – RCS) é uma medida obtida a campo distante utilizada para caracterizar as propriedades de espalhamento de um alvo e possui unidade de área (m^2). Em geral, 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. A RCS de um objeto em uma dada direção é definida em Fung (1994), como sendo a seção transversal de um espalhador isotrópico que gera a mesma densidade de potência espalhada que o objeto na direção de observação. A RCS de um objeto (alvo) é, então, expressa por:

$$RCS(\vec{k}_s, \vec{k}_i) = \lim_{r \rightarrow \infty} \left[4\pi r^2 \frac{|\vec{E}^s(\vec{k}_s)|^2}{|\vec{E}^i(\vec{k}_i)|^2} \right],$$

onde $\vec{E}^i(\vec{k}_i)$ é o vetor campo elétrico da onda plana incidente na direção \hat{k}_i e $\vec{E}^s(\vec{k}_s)$ é o vetor campo elétrico da onda espalhada na direção \hat{k}_s recebido a uma distância r do alvo. A RCS também pode ser representada graficamente em função dos ângulos de elipsidade e de orientação da onda eletromagnética transmitida. De acordo com Evans et al.(1988) e van Zyl (1989) esta representação é denominada de resposta polarimétrica ou assinatura polarimétrica. Esta assinatura pode ser apresentada em co-polarização (polarização principal) ou em polarização cruzada. No primeiro caso as antenas transmissora e receptora possuem a mesma polarização e no segundo caso possuem polarizações ortogonais.

Embora a resposta polarimétrica não seja única, em Ulaby e Elachi (1990) é mostrado que uma esfera e um refletor de canto triédico possuem a mesma resposta, ela pode ser usada como um atributo discriminador de alvos. Xu e Jin (2005) também afirmam que diferentes espalhadores com diferentes orientações podem produzir espalhamentos similares e vice versa e um mesmo espalhador com orientação aleatória pode produzir espalhamentos diferentes conduzindo à confusão na classificação.

Vários parâmetros têm sido propostos para auxiliar a interpretação e a classificação de dados SAR polarimétricos. Por exemplo, os parâmetros entropia, anisotropia e ângulo α derivados da decomposição da matriz de espalhamento dos alvos (Cloude e Pottier, 1996). Yamada e Hoshi (2001) introduziram o conceito de medida de forma de polarização extraída do diagrama da resposta polarimétrica. A medida de forma é descrita pela posição onde o valor de espalhamento é máximo para a polarização linear no sistema de coordenadas ψ - χ .

3. Modelagem Eletromagnética

O problema do espalhamento eletromagnético é abordado, neste trabalho, utilizando-se a técnica de onda completa no domínio espectral. É empregado o mesmo formalismo matemático usado em Civitanes (1992). No entanto, esta técnica foi adaptada ao caso em que a estrutura é excitada através de ondas planas e uniformes.

A técnica de onda completa foi desenvolvida baseada em uma estrutura geral. Estrutura esta mostrada na **Figura 1a**, é composta por quatro camadas dielétricas isotrópicas superpostas, cada uma possuindo permissividade elétrica ϵ_n , ($n \in \{0, 1, 2, g\}$) e permeabilidade magnética μ_0 . Enquanto que as duas camadas exteriores, o vácuo, como camada superior, e o *ground*, como camada inferior, possuem espessuras ilimitadas, as duas camadas interiores possuem espessuras variáveis (d_1 e d_2). Nesta formulação perdas podem ser introduzidas nas camadas interiores e no *ground*. Esta estrutura é excitada através de uma onda plana e uniforme, elipticamente polarizada e com incidência oblíqua (definida pelos ângulos θ_i e ϕ_i de um sistema de coordenadas esféricas), a qual induzirá densidades superficiais de corrente elétrica sobre os

elementos espalhadores localizados nas interfaces entre as camadas. As densidades superficiais de corrente induzidas nos elementos espalhadores são as fontes utilizadas no cálculo dos campos eletromagnéticos espalhados pela estrutura. Os campos eletromagnéticos são obtidos no domínio espectral a partir da resolução de um sistema de equações integrais e do conhecimento das respectivas funções de *Green* espectrais em cada uma das camadas. O método dos momentos (*Method of Moments - MoM*) é empregado na solução destas equações integrais, possibilitando a determinação da densidade de corrente induzida na superfície dos elementos espalhadores. Também são estabelecidas expressões assintóticas para as componentes do campo elétrico distante irradiado pelas correntes fontes. A partir dos campos espalhados pode-se, então, calcular a matriz de espalhamento da estrutura assim como sua RCS.

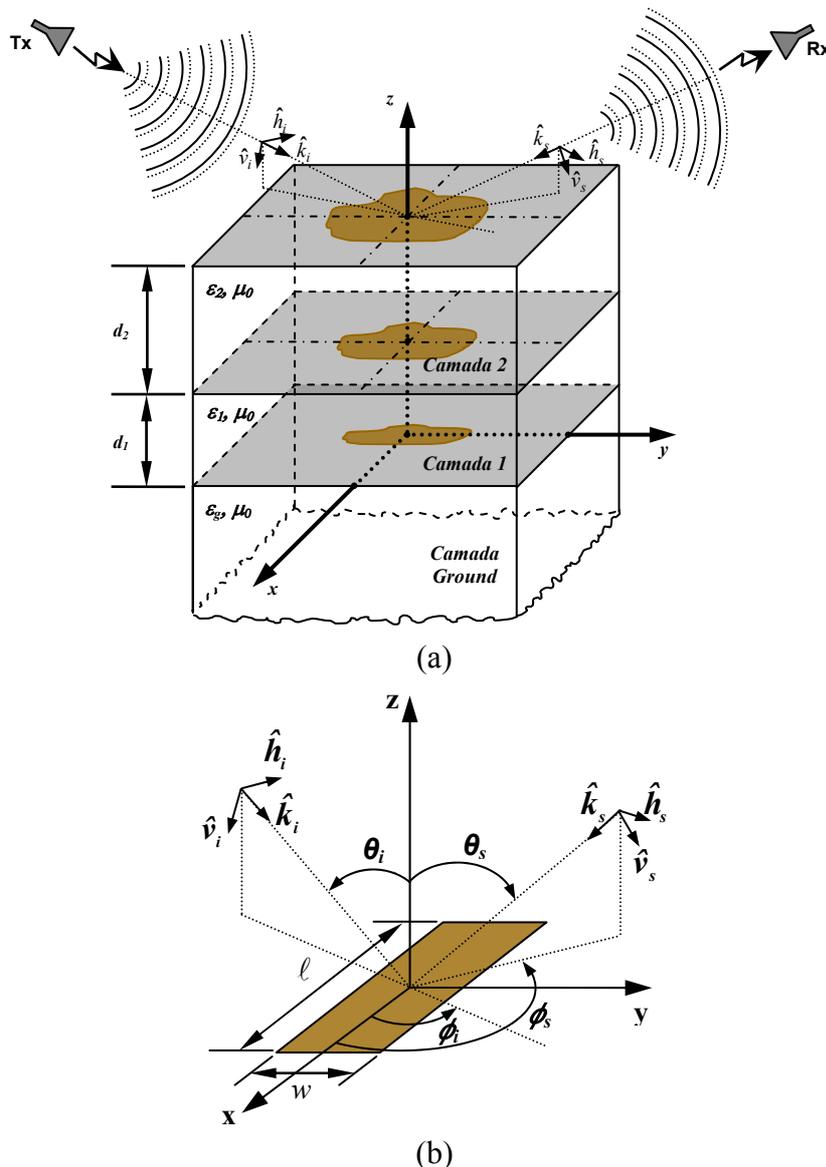


Figura 1 - Geometria da estrutura com o sistema de coordenadas de referência: (a) estrutura geral e (b) geometria do dipolo planar.

A estrutura em análise neste trabalho é um dipolo elétrico planar orientado ao longo do eixo x de um sistema de coordenadas retangulares. O dipolo possui largura w e comprimento ℓ (**Figura 1b**), está impresso na interface entre o vácuo e a camada 2 ($z = d_1 + d_2$) e as camadas dielétricas possuem as mesmas características dielétricas do vácuo, isto é, não possuem perdas

e $\varepsilon_n = \varepsilon_0$ (permissividade do vácuo). O dipolo é um caso particular de um elemento retangular, no qual a largura é muito menor que o comprimento.

4. Resultados e Discussão

A análise do espalhamento eletromagnético do dipolo planar foi realizada na frequência de 1,25 GHz (banda L). Na caracterização do espalhamento do dipolo utilizou-se a RCS em função da direção de incidência da onda plana, a resposta polarimétrica e o ângulo α da decomposição da matriz de espalhamento proposta por Cloude e Pottier (1996). Estes parâmetros são denominados por parâmetros de caracterização. Vale ressaltar que tanto a entropia quanto a anisotropia oriundas de tal decomposição devem ser nulas para alvos determinísticos, fato este confirmado neste trabalho. Em todas as análises subsequentes a direção na qual foi calculado o campo elétrico espalhado pelo dipolo planar é igual à direção de incidência da onda, ou seja $\theta_i = \theta_s$ e $\phi_i = \phi_s$ (caso de um radar monoestático).

Uma vez que a densidade de corrente induzida sobre o elemento espalhador é proporcional à projeção do campo elétrico incidente, analisou-se a variação dos parâmetros de caracterização com relação à razão ℓ/w . Para tanto, utilizou-se nesta análise $\theta_i = 40^\circ$ e $\phi_i = 60^\circ$, os valores 10, 20, 40, 100, 200 e 400 para a citada razão e fez-se a dimensão $\ell = 95,83 \text{ mm}$. Verificou-se que o parâmetro α não variou em função desta razão, assim como a forma da resposta polarimétrica e da RCS. Contudo, há uma variação decrescente das magnitudes destes dois últimos parâmetros com o aumento da razão. Na **Figura 2** é mostrado o gráfico da variação da RCS em elevação e em azimute em função da razão ℓ/w , para o caso em que o dipolo planar é excitado por uma onda com polarização linear horizontal. Esta diminuição da magnitude pode ser explicada pela diminuição da área do dipolo planar com o aumento da razão, ou seja, com menos área para se induzir corrente menor será o campo elétrico espalhado pela estrutura.

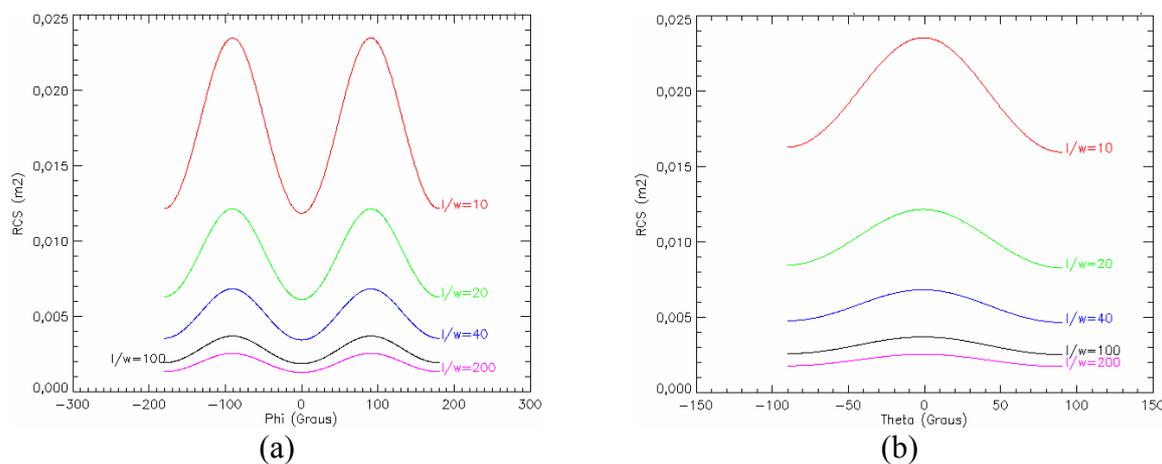


Figura 2 - RCS em função da razão ℓ/w : (a) azimute e (b) elevação.

Utilizando-se um dipolo planar com razão ℓ/w de 20, analisou-se os parâmetros de caracterização com relação à variação dos ângulos de incidência θ_i e ϕ_i . Nesta análise, primeiramente fixou-se ϕ_i em 60° variou-se θ_i no seguinte conjunto de valores $\{1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 89\}$. Posteriormente fixou-se θ_i em 40° variou-se ϕ_i de 0° até 340° em passos de 20° .

As **Figuras 3a** e **3b** ilustram como o parâmetro α varia em função dos ângulos θ_i e ϕ_i , respectivamente. Observa-se que em ambos casos o valor de α não é igual à 45° (linha tracejada) como afirmado por Cloude e Pottier (1996). Isto ocorre, provavelmente, devido à

existência das componentes cruzadas bem como da componente ortogonal à orientação do dipolo planar na matriz de espalhamento do mesmo. No referido trabalho estas componentes são nulas.

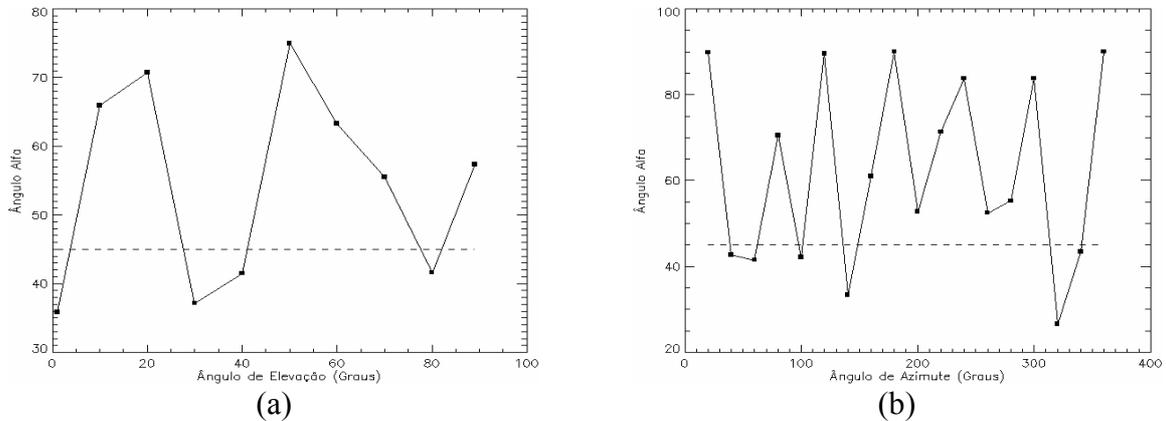


Figura 3 – Variação do parâmetro α em função dos ângulos de incidência: (a) θ_i e (b) ϕ_i .

Gráficos da variação da RCS em azimute, em função dos ângulos θ_i e ϕ_i , são mostrados na **Figura 4**. Nota-se desta figura que a forma das curvas de RCS é a mesma, somente a magnitude apresenta variações de acordo com a variação de θ_i e ϕ_i . A mesma afirmação pode ser feita com relação às curvas de RCS em elevação e também com relação à polarização da onda incidente ser linear vertical ou horizontal. Observou-se, outrossim, que os valores de RCS são iguais dentro dos seguintes conjunto de valores de ϕ_i (expressos em graus): $\{0, 180\}$, $\{20, 160, 200, 340\}$, $\{40, 140, 220, 320\}$, $\{60, 120, 240, 300\}$ e $\{80, 100, 260, 280\}$.

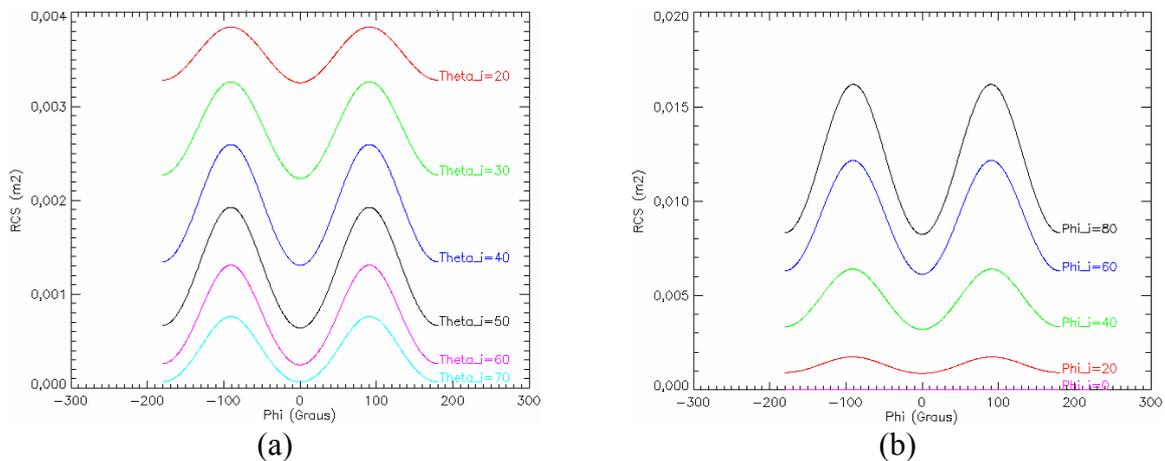
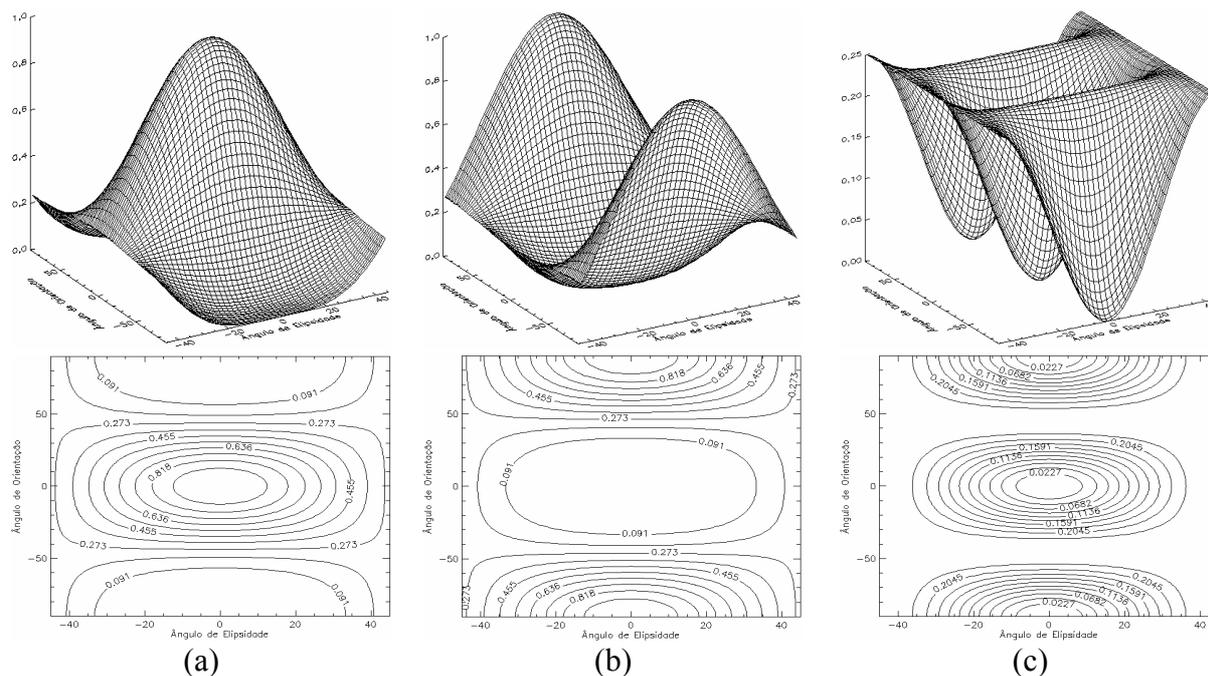


Figura 4 – RCS em azimute para variação em: (a) θ_i (com polarização vertical) e (b) ϕ_i , (com polarização horizontal)

As respostas polarimétricas de um dipolo elétrico filamental são apresentadas na **Figura 5**. Nas **Figuras 5a** e **5b** observam-se os gráficos da co-polarização de um dipolo filamental orientado verticalmente e horizontalmente, respectivamente. O gráfico da resposta polarimétrica em polarização cruzada é igual para o dipolo orientado na vertical ou na horizontal, sendo ilustrado na **Figura 5c**. Pode-se notar que no caso do dipolo orientado verticalmente a resposta é máxima quando as ondas, transmitida e recebida possuem polarização linear vertical ($\chi = 0^\circ$ e $\psi = 0^\circ$). Neste caso a resposta será mínima (**Figura 5c**) quando as ondas, transmitida e recebida possuem polarizações lineares ortogonais ($\chi = 0^\circ$ e $\psi = -90^\circ, 0^\circ$ ou 90°).

A resposta polarimétrica do dipolo planar apresentou forma similar a do dipolo filamental, porém com a posição de máxima resposta deslocada ao longo da orientação (bem visível no gráfico de contornos). Ao se aumentar θ_i até 89° esta posição de máxima resposta tendeu àquela do dipolo filamental. Isto indica que a máxima resposta ainda ocorre para polarizações lineares, entretanto há uma componente ortogonal à polarização principal do campo elétrico recebido. Nas **Figuras 6a** e **6b** são mostrados, respectivamente, os gráficos da resposta polarimétrica na co-polarização e na polarização cruzada quando $\theta_i = 10^\circ$. Já a **Figura 6c** ilustra a resposta polarimétrica na co-polarização para $\theta_i = 89^\circ$. Neste último caso a resposta é praticamente coincidente com a do dipolo filamental.



Com a variação de ϕ_i notou-se que a resposta polarimétrica do dipolo planar pode ser interpretada como sendo de um dipolo filamental orientado verticalmente (**Figura 7a**) ou também de um orientado horizontalmente (**Figura 7b**). Isto ocorreu para $\phi_i = 0^\circ$ e $\phi_i = 100^\circ$, respectivamente. O gráfico da resposta polarimétrica foi o mesmo para os seguintes pares de ϕ_i (representados em graus): $\{0, 180\}$, $\{20, 200\}$, $\{40, 220\}$, $\{60, 240\}$, $\{80, 260\}$, $\{100, 280\}$, $\{120, 300\}$, $\{140, 320\}$ e $\{160, 340\}$.

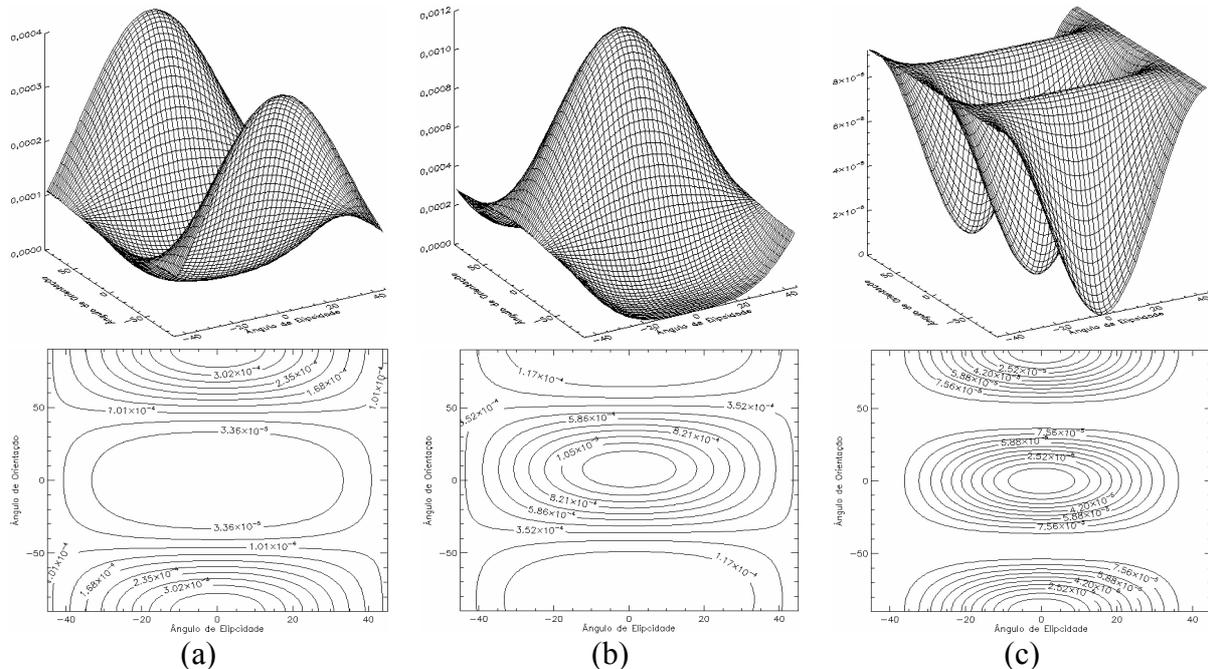


Figura 7 - Resposta polarimétrica do dipolo planar (variação em ϕ_i).

4. Conclusões

A caracterização do espalhamento de um dipolo elétrico planar foi realizada através da RCS, da resposta polarimétrica e do ângulo α da decomposição Cloude e Pottier (1996). Os valores obtidos para o ângulo α apresentam grande variação, não estando em boa concordância com o valor de 45° descrito na literatura. Isto se deve, principalmente, ao fato da matriz de espalhamento do dipolo planar não possuir elementos nulos nas componentes cruzadas e também na componente ortogonal a orientação do dipolo. A RCS do dipolo planar possui curvas com o mesmo formato, porém com magnitudes que variam com os ângulos de incidência θ_i e ϕ_i de acordo com o descrito na literatura. A resposta polarimétrica também, mostrou ser sensível à variação de θ_i e ϕ_i . Isto evidencia que a interpretação e o uso da resposta polarimétrica como atributo discriminador de alvos deve ser realizada com extremo cuidado.

Referências

- Chiu, T.; Sarabandi, K. Electromagnetic scattering interaction between a dielectric cylinder and a slightly rough surface. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 47, n. 5, p. 902-913, 1999.
- Cividanes, L. B. T. **Análise de antenas de microfita em estruturas multicamadas com dielétricos uniaxiais**. 1992. 136p. Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1992.
- 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.
- Evans, D. L.; Farr, T. G.; van Zyl, J. J.; Zebker, H. A. Radar polarimetry: analysis tools and applications. **IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, n. 6, p. 774-789, 1988.

- Franceschetti, G.; Iodice, A.; Riccio, D. A canonical problem in electromagnetic backscattering from buildings. **IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 3, p. 1787-1801, 2002.
- Freeman, A.; Durden, S. L. A three component scattering model for polarimetric SAR data. **IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 3, p. 963-973, 1998.
- Fung, A. K. **Microwave scattering and emission models and their applications**. Norwood, Artech House, 1994, 573p.
- Krogager, E. **Aspects of polarimetric radar imaging**. 1993. 235p. PhD Thesis – Technical University of Denmark, Danish Defense Research. Establishment, Lyngby, 1993.
- Long, M. W. **Radar reflectivity on land and sea**. Norwood, Artech House, 2001, 534p.
- Ulaby, F.T.; Elachi, C. **Radar polarimetry for geoscience applications**. Norwood, Artech House, 1990, 364p.
- van Zyl, J. J. Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data. **IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing**, v. 27, n. 1, p. 36-45, 1989.
- van Zyl, J. J.; Zebker, H. A.; Elachi, C. Imaging radar polarization signatures: theory and observation. **Radio Science**, v. 22, n. 4, p. 529-543, 1987.
- Xu, F.; Jin, Y. Q. Deorientation theory of polarimetric scattering targets and application to terrain surface classification. **IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 10, p. 2351-2364, 2005.
- Yamada, T.; Hoshi, T. Expansion of the unsupervised classification of polarimetric SAR images based on the scattering types using the shape features of polarization signature diagrams. In: Asian Conference on Remote Sensing, 22., 2001, Singapore. **Anais**.