

## Fundamentos de Polarimetria SAR

Nilo Sergio de Oliveira Andrade<sup>1,2</sup>  
Antonio Nuno de Castro Santa Rosa<sup>2</sup>  
Paulo César de Carvalho Faria<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Comando da Aeronáutica – Centro de Lançamento de Alcântara – CLA  
Av. dos Libaneses, nº 29 – Tirirical – 65056-480 – São Luís – MA, Brasil  
dop@cla.aer.mil.br

<sup>2</sup> Instituto de Geociências – Universidade de Brasília – UNB  
Campus Universitário Darcy Ribeiro – CEP 70910-900 - Brasília – DF, Brasil  
nunos@unb.br

<sup>3</sup> Departamento de Química – Instituto Tecnológica da Aeronáutica – ITA  
Praça Mal Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias – 12228-900 – S.J. Campos – SP, Brasil  
carvalho@ita.br

**Abstract.** In order to understand Synthetic Aperture Radar (SAR), one needs first to define some fundamental polarimetry concepts / definitions, such as polarization ellipse, left-handed / right-handed polarization, and so on. For that, one briefly brings to consideration the mathematical relations that characterize the polarization ellipse and the polarization states.

**Palavras-chave:** remote sensing, radar polarimetry, polarization ellipse, sensoriamento remoto, polarimetria, elipse de polarização.

## 1. Introdução

Apesar da complexidade do assunto (CCRS, 2001; Ulaby e Elachi, 1990), a polarimetria em termos simples, refere-se ao estudo:

- da orientação da onda eletromagnética com relação à superfície terrestre;
- do espalhamento dessa onda; e
- da informação de fase entre os dois canais, horizontal (H) e vertical (V).

Para uma onda plana, o comprimento do vetor campo elétrico define a amplitude da onda; a velocidade de rotação estabelece a frequência da onda, enquanto que a orientação e a forma geométrica traçada pela ponta desse vetor determinam a polarização da onda.

Uma onda eletromagnética pode ser polarizada (uma senóide monocromática com frequência constante e amplitude estável caracteriza uma onda totalmente polarizada), despolarizada (com polarização aleatória) ou, ainda, apresentar um comportamento intermediário entre esses dois extremos, caracterizado por certo grau de polarização.

Inúmeros radares são projetados para transmitir a radiação de microondas polarizada horizontalmente ou verticalmente. Uma onda transmitida em quaisquer dessas polarizações vai gerar uma onda retroespalhada com uma variedade de polarizações. É a análise destas combinações de polarizações transmitidas e recebidas que constitui a ciência da Polarimetria Radar.

Qualquer tipo de polarização, tanto na transmissão quanto na recepção, pode ser sintetizada a partir da combinação adequada dos componentes vertical e horizontal. Por esta razão, sistemas que transmitem e recebem em ambas as polarizações são de interesse para o estudo da polarimetria. Neste caso, podem existir quatro combinações de polarizações transmitidas e recebidas.

- HH – para recepção e transmissão horizontal;
- VV – para recepção e transmissão vertical;
- HV – para transmissão horizontal e recepção vertical; e
- VH – para transmissão vertical e recepção horizontal.

As duas primeiras combinações de polarização são chamadas de *co-polarized* ou polarizações paralelas, pois as polarizações de transmissão e recepção são as mesmas. As duas últimas são chamadas de *cross-polarized* ou polarizações cruzadas porque as polarizações transmitidas e recebidas são ortogonais entre si.

Os sistemas de radar podem ter combinações de polarização diferentes:

- Polarização simples – HH ou VV;
- Polarização dupla – HH e HV, VV e VH ou HH e VV;
- Polarização quádrupla – HH, VV, HV, e VH; e
- Completamente polarimétrico – HH, VV, HV, VH, mais a fase relativa entre estas polarizações, componente importante de um radar polarimétrico.

As equações de Maxwell descrevem todos os aspectos da radiação eletromagnética e, para um ponto localizado no tempo e no espaço, o campo elétrico, o campo magnético, a densidade de fluxo magnético e o deslocamento do campo elétrico devem satisfazer estas equações (detalhes podem ser obtidos em Born and Wolf, 1980; Hecht and Zajac, 1979).

Para o imageamento por radar, é importante caracterizar o campo elétrico  $\vec{E}$  (vetor  $E$ ) quanto a sua orientação em relação à direção de propagação da onda eletromagnética.

### 1.1. Polarização Elíptica

Uma onda cujo vetor campo elétrico, em um ponto fixo do espaço, traça uma mesma elipse de forma repetitiva, é dita elipticamente polarizada naquele ponto, sendo este o caso mais

comum de polarização de qualquer onda estritamente monocromática (Azzam and Bashara, 1986).

Particularizações da polarização elíptica ocorrem quando esta se degenera em um círculo (polarização circular) ou em um segmento de reta (polarização linear).

Para a completa caracterização da polarização elíptica é preciso saber (**Figura 1**):

- A orientação, no espaço, do plano que contém a elipse de polarização, dada pelo vetor  $\hat{n}$  normal a esse plano;
- A orientação da elipse nesse plano;
- As dimensões (forma) da elipse; e
- A fase absoluta.

Na **Figura 1**, X e Y são duas direções de referência que, juntamente com o vetor  $\hat{n}$ , formam um sistema ortogonal de coordenadas, orientado para a direita.

Os parâmetros que definem a elipse de polarização, nesse plano, são descritos a seguir:

O azimute  $\psi$ , também chamado de ângulo de inclinação (ou orientação), é o ângulo entre o semi-eixo maior da elipse e uma direção de referência, escolhida na **Figura 1** como a direção positiva do eixo X, e define a orientação da elipse no seu plano.

Todos os azimutes podem ser obtidos limitando-se  $\psi$  entre  $-\frac{\pi}{2}$  e  $\frac{\pi}{2}$ , ou seja:

$$-\frac{\pi}{2} \leq \psi < \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

A excentricidade  $e$  é definida como a razão entre o comprimento do semi-eixo menor  $b$  e o semi-eixo maior  $a$  da elipse;

$$e = \frac{b}{a} \quad (2)$$

Podem-se diferenciar dois casos de polarização, de acordo com o modo pelo qual a ponta do vetor campo elétrico descreve a elipse.

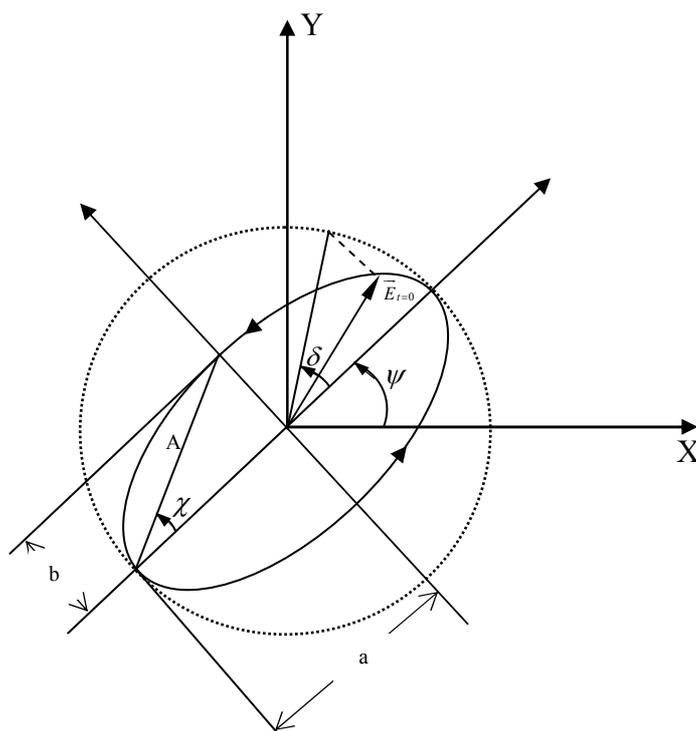


Figura 1. Ilustração da evolução de uma onda eletromagnética apresentando as polarizações linear vertical, elíptica e circular.

Fonte: adaptada de Azzam and Bashara (1986, p. 7).

Assim, diz-se que a polarização é orientada para a direita quando, para um observador olhando na direção da origem da radiação, a ponta do vetor campo elétrico parece descrever uma elipse no sentido horário.

Para a polarização orientada para a esquerda, ocorre justamente o oposto, ou seja, para esse mesmo observador, a ponta do vetor campo elétrico parece descrever uma elipse na direção contrária à dos ponteiros do relógio.

Conforme pode ser observado na **Figura 2**, o sentido de rotação da elipse no plano, levando em conta um observador olhando para a direção de onde a onda está vindo, é para a direita, ou seja, no sentido horário, caracterizando-se, assim, a polarização com direção de rotação orientada para a direita, em inglês, “right-handed polarization”.

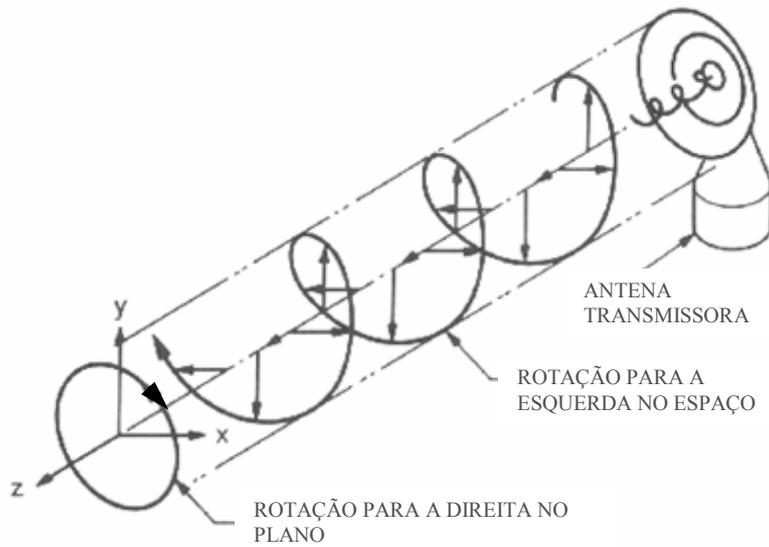


Figura 2. Polarização circular orientada para a direita.  
 Fonte: adaptada de Ulaby and Elachi (1990, p. 8).

É conveniente incorporar o conceito de direção de orientação da elipse na definição da excentricidade  $e$ , permitindo que esta assumira valores positivos e negativos para as polarizações orientadas para a direita e esquerda, respectivamente.

Dessa forma, todos os valores possíveis para a excentricidade  $e$  ficam restritos a:

$$-1 \leq e \leq 1 \quad (3)$$

Agora, introduzindo-se o ângulo de excentricidade  $\chi$ .

$$\tan \chi = e = \pm \frac{b}{a} \quad (4)$$

Onde,  $2a$  e  $2b$  correspondem aos eixos maior e menor da elipse, respectivamente. Os valores de  $\chi$  ficam limitados a:

$$-\frac{\pi}{4} \leq \chi \leq \frac{\pi}{4} \quad (5)$$

A amplitude (tamanho) da elipse pode ser definida em termos do comprimento dos semi-eixos maior e menor,  $a$  e  $b$ , respectivamente:

$$A = (a^2 + b^2)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Por outro lado, a fase absoluta  $\delta$  determina o ângulo entre a posição inicial do vetor campo elétrico em  $t=0$  e o eixo maior da elipse, conforme **Figura 1**. Logo, os valores possíveis para a fase absoluta são:

$$-\pi \leq \delta \leq \pi \quad (7)$$

Finalmente, o campo elétrico de uma onda que se propaga em um determinado meio pode ser decomposto em dois eixos ortogonais (soma vetorial de dois campos elétricos polarizados horizontalmente e verticalmente). Estes dois componentes são caracterizados por suas fases e amplitudes. A polarização de uma onda depende da amplitude e da diferença de fase entre esses dois componentes.

Se a diferença de fase é igual a 0 (zero), a onda é dita linearmente polarizada. Se os componentes têm igual amplitude e diferença de fase de  $\pm\pi/2$ , a polarização é dita circular. Para outros casos, o vetor campo elétrico traça uma elipse perpendicular à direção de propagação, resultando em uma polarização elíptica.

Os casos especiais incluem a polarização linear vertical ( $\chi = 0^0, \psi = 0^0$ ); a polarização linear horizontal ( $\chi = 0^0, \psi = 90^0$ ) e a polarização circular ( $\chi = \pm 45^0, \psi$  variando de  $-90^0$  a  $+90^0$ ).

## 2. Caracterização do Estado de Polarização de uma Onda Eletromagnética

Para se caracterizar o estado de polarização de uma onda eletromagnética, faz-se necessária a definição de uma base de vetores ortogonais, sobre os quais será decomposto o vetor campo elétrico. É comum utilizar-se polarizações lineares verticais e horizontais para isso. Contudo, o uso de polarizações circulares, orientadas para a esquerda ou para a direita, também é válido.

Utilizando-se como base a polarização horizontal-vertical, os componentes de um vetor campo elétrico  $\vec{E}(t)$  são dados por:

$$\vec{E}(t) = \begin{pmatrix} E_h \\ E_v \end{pmatrix} e^{-i\omega t} = \begin{pmatrix} a_h e^{-i\delta_h} \\ a_v e^{-i\delta_v} \end{pmatrix} e^{-i\omega t} \quad (8)$$

onde,  $\omega$  é a frequência angular;  $E_h$  e  $E_v$  são os componentes complexos horizontal e vertical do vetor campo elétrico, com amplitudes  $a_h$  e  $a_v$  e fases  $\delta_h$  e  $\delta_v$ , respectivamente.

## 3. Diferentes Estados de Polarização

A polarização linear ocorre quando o vetor campo elétrico oscila em uma linha reta perpendicular à direção de propagação. A **Figura 3** apresenta o formato geométrico gerado pelos vetores campo elétrico de polarizações horizontal e vertical ao longo de todo um ciclo de fase. Neste caso, a fase ( $\delta_h = \delta_v$ ), ou seja, a diferença de fase entre os vetores componentes do campo elétrico é igual a zero, e uma das amplitudes (horizontal ou vertical, conforme a figura) é nula.

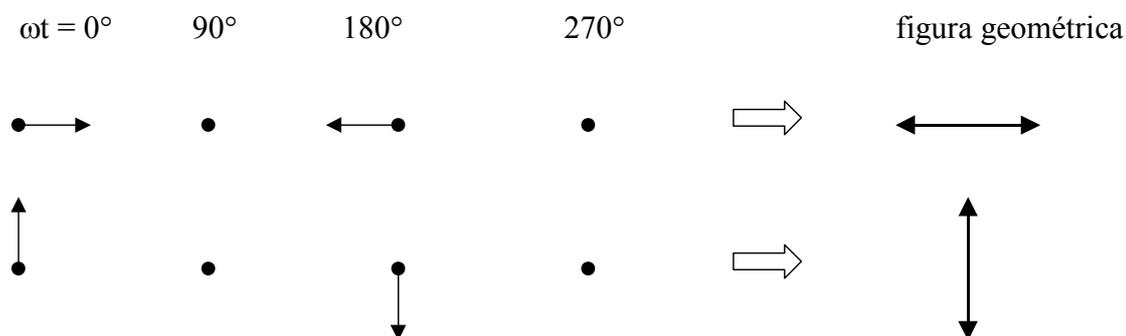


Figura 3. Formato geométrico gerado pelos vetores campo elétrico de polarizações vertical e horizontal.

Outros estados de polarização ocorrem quando estes campos elétricos ortogonais são superpostos. Quando a superposição ocorre em fase ( $\delta_h = \delta_v$ ), gera-se outra polarização linear cuja orientação é determinada pelas amplitudes relativas dos campos componentes. Amplitudes iguais levam a uma orientação de  $45^\circ$ , conforme mostrado na **Figura 4**.

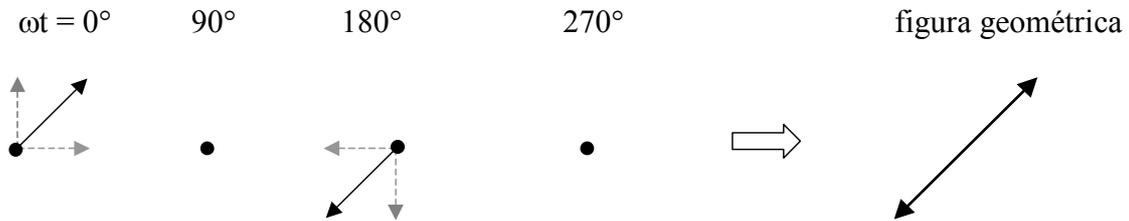


Figura 4. Formato geométrico gerado por vetores campo elétrico, superpostos em fase.

A polarização elíptica é obtida quando os campos elétricos são superpostos fora de fase ( $\delta_h \neq \delta_v$ ), sendo sua diferença de fase dada por ( $\delta_h - \delta_v = \pm 45^\circ$ ).

A polarização circular, caso particular da polarização elíptica, é gerada quando a diferença de fase entre os campos elétricos, de mesma amplitude, é dada por ( $\delta_h - \delta_v = \pm 90^\circ$ ), conforme apresentado na **Figura 5**. O sinal da diferença de fase determina a direção de rotação do campo elétrico resultante.

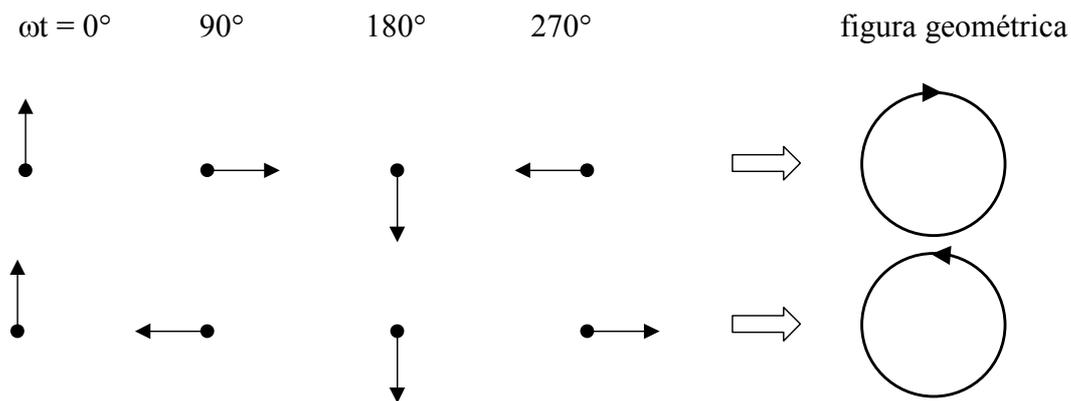


Figura 5. Formato geométrico gerado por vetores campo elétrico, superpostos, mas fora de fase.

A **Figura 1**, anteriormente apresentada, mostra em detalhes a forma geométrica gerada pela ponta do vetor campo elétrico no plano ortogonal à direção de propagação (polarização elíptica típica), à medida que a onda se desloca no espaço (Born and Wolf, 1985, Tsang et al., 1985, Ulaby and Elachi, 1990).

Conforme visto, a elipse é caracterizada por sua excentricidade e orientação, e essas características são determinadas por  $E_h$  e  $E_v$ . O ângulo de excentricidade  $\chi$  se relaciona com os parâmetros da onda por:

$$\text{sen}2\chi = \frac{2a_v a_h}{a_v^2 + a_h^2} \text{sen}(\delta_h - \delta_v), \text{ assumindo valores de } -45^\circ \text{ a } +45^\circ. \quad (9)$$

A tangente de  $\chi$  determina a razão entre os eixos da elipse e o seu sinal define a direção de rotação (observador olhando na direção de onde a onda está vindo). Para  $\chi > 0^\circ$  a rotação é no sentido dos ponteiros do relógio ou para a direita e para  $\chi < 0^\circ$  a rotação é no sentido inverso. Quando  $\chi = 0^\circ$  a elipse degenera-se em uma linha e o sentido de rotação é indefinido e quando  $\chi = 45^\circ$  a elipse degenera-se em um círculo.

Ainda, se as amplitudes forem iguais, ou seja, ( $a_h = a_v$ ) e a diferença de fase ( $\delta_h - \delta_v = \pm 90^\circ$ ), a elipse se degenera para um círculo, com o sinal positivo correspondendo à polarização circular para a esquerda e o sinal negativo correspondendo à polarização circular para a direita.

A orientação do eixo maior da elipse com relação à direção de referência (eixo X) é dada por  $\psi$ ; assumindo valores de  $-90^\circ$  a  $+90^\circ$ ;  $\psi$  relaciona-se com os demais parâmetros da onda por

$$\tan 2\psi = \frac{2a_v a_h}{a_v^2 - a_h^2} \cos(\delta_h - \delta_v) \quad (10)$$

Para a polarização circular o ângulo de orientação é indefinido.

Segundo Born and Wolf (1985); Ulaby and Elachi (1990), os ângulos de orientação  $\psi$  e de excentricidade  $\chi$  relacionam-se aos parâmetros da onda, ou seja, às projeções do vetor campo elétrico nos eixos X e Y,  $E_{x0}$  e  $E_{y0}$ , e à diferença de fase  $\delta$  por intermédio das equações 11 e 12.

$$\text{sen}(2\chi) = \text{sen}(2\alpha)\text{sen}(\delta) \quad (11)$$

$$\tan(2\psi) = \tan(2\alpha) \cos(\delta) \quad (12)$$

O ângulo auxiliar  $\alpha$  (**Figura 1**) é assim definido:

$$\tan(\alpha) = \frac{a_h}{a_v} \quad (13)$$

## Conclusão

O conhecimento dos fundamentos básicos que norteiam a polarimetria SAR é de suma importância para que a análise dos dados e a extração de informações sejam adequadamente realizadas.

Assim sendo, este trabalho teve por objetivo apresentar os conceitos básicos relacionados à onda eletromagnética, à elipse de polarização, aos parâmetros que caracterizam essa elipse e às informações que podem ser extraídas a partir da mesma.

## Referências

- Andrade, N. S. O. **Radar de Abertura Sintética Polarimétrico do SIVAM – Análise e Aplicações**. Tese de Doutorado (em fase de escrita). Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília – D.F. 2006.
- Azzam, R.M.A. and Bashara, N.M. **Ellipsometry and polarized light**. Elsevier Science Publishers, N.Y., 1986, 538 p.
- Born, M. and Wolf, E. **Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light**. Pergamon Press, Elmsford, N.Y., 1980, 806 p.
- Born, M. and Wolf, E. **Principles of Optics**, Seventh Edition, Pergamon Press, New York, 1985, 936 p.
- CCRS, **Applications Potential for RADARSAT-2**, J. van der Sanden and S. Ross (Eds), Ottawa, Canada, 2001, 117 p.
- Tsang, L., Kong, J. A.; Shin, R.T. **Theory of microwave remote sensing**, Wiley Interscience, 1985, 435 p.
- Ulaby, F. and Elachi, C. **Radar Polarimetry for Geoscience Applications**, Artech House, 1990. 364 p.
- Hecht, E. and Zajac, A. **Optics**. Addison-Wesley Publishing Company, 1979, 332 p.