

Sistemas de coordenadas aplicados à polarimetria SAR

Nilo Sergio de Oliveira Andrade^{1,2}
Antonio Nuno de Castro Santa Rosa²
Paulo César de Carvalho Faria³

¹ 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

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

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

Abstract. The two coordinate systems, Forward Scatter Alignment (FSA) and Backscatter Alignment (BSA) conventions, used to mathematically represent the scattering properties of a target, are introduced. So are the matrices, Scattering Matrix and Mueller Matrix, which relate the incident (illumination) signal vector, the Stokes vector or the Electric-Field vector, to the Scattered or Transmitted one.

Palavras-chave: coordinate system, Back-Scatter Alignment (BSA), Forward Scatter Alignment (FSA), sistema de coordenadas, espalhamento no sentido de deslocamento da onda (medido no alvo), espalhamento no sentido do retroespalhamento da onda (medido na antena).

1. Introdução

Neste trabalho serão introduzidos os sistemas de coordenadas normalmente utilizados para sistemas SAR, de acordo com a convenção adotada pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*): o sistema de coordenadas baseado na antena e o sistema de coordenadas baseado na onda.

2. Sistema de coordenadas

Segundo Hellmann (2001), o processo de espalhamento pode ser visto como a transformação da onda incidente na onda espalhada. Para um caso geral, o estado de polarização da onda incidente modifica-se quando deste processo.

Para aplicações na área de Sensoriamento Remoto, a superfície terrestre é normalmente representada por um sistema de coordenadas com origem em um ponto O localizado sobre a superfície de um espalhador, enquanto os vetores de polarização das ondas incidente e espalhada são representados em termos de um sistema de coordenadas esférico $(r_s; \theta_s; \phi_s)$ e $(r_i; \theta_i; \phi_i)$, (Hellmann, 2001).

Os cálculos de retroespalhamento são realizados utilizando-se dois tipos principais de sistemas de coordenadas, conforme definido pelo IEEE, ou seja, duas convenções: o FSA “Forward Scatter Alignment” – espalhamento no sentido de deslocamento da onda (medido no alvo); e o BSA “Backscatter Alignment” – espalhamento no sentido do retroespalhamento da onda (medido na antena).

A convenção FSA é um sistema orientado pela onda, que define o sistema de coordenadas local orientado para a direita (sentido dos ponteiros do relógio) em relação à direção de propagação da onda. Já a convenção BSA é um sistema orientado pela antena, definindo o sistema de coordenadas local em relação à polarização da antena (Hellmann, 2001).

A polarização da antena é definida como a polarização de uma onda transmitida pela antena com direção de propagação \vec{k} , apontando para fora da antena mesmo quando a antena é utilizada como um receptor.

Utilizando-se esta convenção, ou seja, BSA, os dois sistemas de coordenadas local coincidem quando as antenas estão localizadas na mesma posição, ou seja, quando somente uma antena é utilizada para a transmissão e recepção (sistema monoestático), o que é vantajoso para aplicações relacionadas à análise do sinal retroespalhado, como em sistemas SAR.

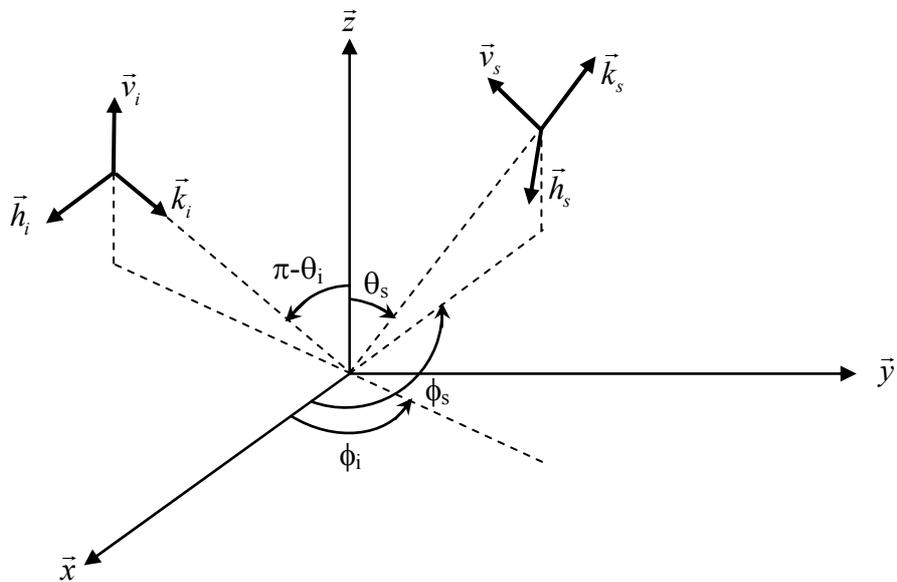


Figura 1. Sistema de coordenadas e geometria de espalhamento para a convenção FSA.
 Fonte: adaptada de Ulaby and Elachi (1990, p.18).

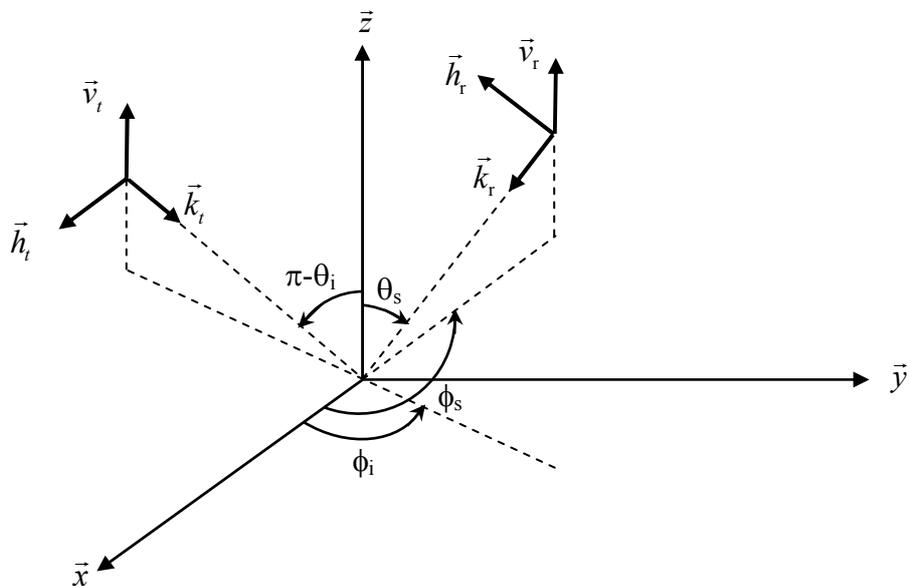


Figura 2. Sistema de coordenadas e geometria de espalhamento para a convenção BSA.
 Fonte: adaptada de Ulaby and Elachi (1990, p.18).

Ambos os sistemas de coordenadas locais são definidos em relação a eixos coordenados com origem no espalhador, conforme apresentado nas **Figuras 1 e 2**, para o caso de antenas biestáticas.

Tomando como exemplo a **Figura 1**, uma onda incide a partir da direção \vec{k}_i e é espalhada na direção \vec{k}_s . O campo incidente é descrito na base ortogonal $(\vec{v}_i, \vec{h}_i, \vec{k}_i)$ e o campo

espalhado na base ortogonal $(\vec{v}_s, \vec{h}_s, \vec{k}_s)$. Ambas as bases são orientadas para a direita em relação à sua direção de propagação correspondente.

É conveniente especificar a orientação destas duas bases com respeito ao plano de incidência, definido como um plano que passa por um ponto O localizado dentro do espalhador e é paralelo aos vetores \vec{k}_i e \vec{k}_s .

Os vetores \vec{v}_i e \vec{v}_s são tomados no plano de incidência enquanto os vetores \vec{h}_i e \vec{h}_s são ortogonais aos vetores \vec{v}_i e \vec{v}_s .

A mudança de uma base orientada para a direita, em inglês “right-handed base”, para uma base orientada para a esquerda, em inglês “left-handed base”, mantém a direção de propagação da onda \vec{k} mas tem o efeito de modificar o sinal de um dos vetores que compõem o campo elétrico. Desta forma, o vetor de Stokes dado por $\vec{S} = [I_0 \ Q \ U \ V]^T$ fica assim representado:

$$\vec{S} = [I_0 \ Q \ -U \ -V]^T \quad (1)$$

Já uma mudança na direção de rotação, ou seja, a mudança de uma polarização com direção de rotação orientada para a direita, em inglês “right-handed polarization”, para uma polarização com direção de rotação orientada para a esquerda, em inglês “left-handed polarization”, ou vice-versa, corresponde simplesmente a uma mudança de E para E^* , ou a uma mudança de sinal na diferença de fase δ . O novo vetor de Stokes fica, então, assim definido:

$$\vec{S} = [I_0 \ Q \ U \ -V]^T \quad (2)$$

Caso estas duas modificações sejam combinadas, ou seja, uma mudança de base com uma mudança da direção de rotação, o Vetor de Stokes obtido fica:

$$\vec{S} = [I_0 \ Q \ -U \ V]^T \quad (3)$$

Tanto a convenção FSA como a BSA aparecem na literatura, sendo a convenção FSA preferida para problemas envolvendo espalhamento biestático causado por partículas e meios não homogêneos. Já a convenção BSA é preferida para o cálculo do retroespalhamento radar de um dado alvo ou meio (Ulaby and Elachi, 1990).

Se a matriz de espalhamento for expressa utilizando-se o sistema de coordenadas baseado na antena, convenção BSA, os campos elétricos transmitidos e recebidos relacionam-se pela **Matriz de Sinclair**; se a matriz de espalhamento utilizar-se do sistema de coordenadas baseado no sentido de deslocamento da onda, sistema FSA, os campos elétricos transmitidos e recebidos relacionam-se por intermédio da **Matriz de Jones**.

Quando a matriz de espalhamento é utilizada sem a citação do sistema de coordenadas empregado, fica subtendido o uso da Matriz de Sinclair, ou seja, o uso da convenção BSA.

A seguir os sistemas de coordenadas FSA e BSA são mais bem detalhados.

3. A convenção FSA

A convenção FSA é um sistema orientado pela onda, de tal forma que as direções dos vetores unitários \vec{v} e \vec{h} são sempre definidas em relação à direção de propagação da onda, \vec{k} . O sistema de coordenadas $(\vec{k}, \vec{v}, \vec{h})$ é escolhido de forma a coincidir com o sistema de coordenadas esférico $(r; \theta; \phi)$. Assim, para uma onda incidente na direção \vec{k}_i , conforme mostrado na **Figura 1**, os vetores unitários são:

$$\vec{k}_i = \cos \phi_i \text{sen} \theta_i \vec{x} + \text{sen} \phi_i \text{sen} \theta_i \vec{y} + \cos \theta_i \vec{z} \quad (4)$$

$$\vec{h}_i = \frac{\vec{z} \times \vec{k}_i}{|\vec{z} \times \vec{k}_i|} = -\text{sen} \phi_i \vec{x} + \cos \phi_i \vec{y} \quad (5)$$

$$\vec{v}_i = \vec{h}_i \times \vec{k}_i = \cos \phi_i \cos \theta_i \vec{x} + \text{sen} \phi_i \cos \theta_i \vec{y} - \text{sen} \theta_i \vec{z} \quad (6)$$

$$\vec{k}_s = \cos \phi_s \text{sen} \theta_s \vec{x} + \text{sen} \phi_s \text{sen} \theta_s \vec{y} + \cos \theta_s \vec{z} \quad (7)$$

$$\vec{h}_s = \frac{\vec{z} \times \vec{k}_s}{|\vec{z} \times \vec{k}_s|} = -\text{sen} \phi_s \vec{x} + \cos \phi_s \vec{y} \quad (8)$$

$$\vec{v}_s = \vec{h}_s \times \vec{k}_s = \cos \phi_s \cos \theta_s \vec{x} + \text{sen} \phi_s \cos \theta_s \vec{y} - \text{sen} \theta_s \vec{z} \quad (9)$$

Para o espalhamento na direção de propagação da onda, $(\theta_s = \theta_i$ e $\phi_s = \phi_i)$, tem-se que $\vec{k}_s = \vec{k}_i$, $\vec{v}_s = \vec{v}_i$ e $\vec{h}_s = \vec{h}_i$. Em contraste, para o retroespalhamento, $(\theta_s = \pi - \theta_i$ e $\phi_s = \pi + \phi_i)$. Desta forma, as relações ficam assim definidas: $\vec{k}_s = -\vec{k}_i$, $\vec{v}_s = \vec{v}_i$ e $\vec{h}_s = -\vec{h}_i$. A direção de propagação \vec{k}_s é oposta à direção \vec{k}_i , conforme esperado, mas somente um dos dois vetores de polarização (no caso, o vetor \vec{h}) tem o sentido invertido ao sofrer retroespalhamento (convenção FSA).

4. A convenção BSA

Enquanto os vetores unitários de polarização, na convenção FSA, são definidos em relação à onda que se propaga, na convenção BSA eles são definidos em relação às antenas, de acordo com o padrão IEEE, que define o estado de polarização de uma antena como sendo a polarização da onda por ela emitida, mesmo quando a antena é utilizada na recepção de sinais.

Conseqüentemente, para o caso do retroespalhamento, na convenção BSA, os vetores de polarização vertical e horizontal da onda espalhada são idênticos aos seus correspondentes da onda incidente.

Os vetores apresentados na **Figura 2**, no sistema de coordenadas local, são:

$$\vec{k}_i = \vec{k}_i = \cos \phi_i \text{sen} \theta_i \vec{x} + \text{sen} \phi_i \text{sen} \theta_i \vec{y} + \cos \theta_i \vec{z} \quad (10)$$

$$\vec{h}_t = \vec{h}_i = -\text{sen}\phi_i \vec{x} + \text{cos}\phi_i \vec{y} \quad (11)$$

$$\vec{v}_t = \vec{v}_i = \text{cos}\phi_i \text{cos}\theta_i \vec{x} + \text{sen}\phi_i \text{cos}\theta_i \vec{y} - \text{sen}\theta_i \vec{z} \quad (12)$$

$$\vec{k}_r = -\vec{k}_s = -[\text{cos}\phi_s \text{sen}\theta_s \vec{x} + \text{sen}\phi_s \text{sen}\theta_s \vec{y} + \text{cos}\theta_s \vec{z}] \quad (13)$$

$$\vec{h}_r = -\vec{h}_s = \text{sen}\phi_s \vec{x} - \text{cos}\phi_s \vec{y} \quad (14)$$

$$\vec{v}_r = \vec{v}_s = \text{cos}\phi_s \text{cos}\theta_s \vec{x} + \text{sen}\phi_s \text{cos}\theta_s \vec{y} - \text{sen}\theta_s \vec{z} \quad (15)$$

Onde os subscritos t e r referem-se à orientação da antena de transmissão (ou incidente) e da antena de recepção (ou o oposto de espalhado), respectivamente. Uma vez que os dois sistemas de coordenadas $(\vec{k}_t, \vec{v}_t, \vec{h}_t)$ e $(\vec{k}_r, \vec{v}_r, \vec{h}_r)$ são idênticos quando as antenas de transmissão e de recepção coincidem em posição, a convenção BSA tem sido a preferida na área de polarimetria radar (Van Zyl et al., 1987).

Para facilitar a distinção entre os dois sistemas de coordenadas locais (convenção FSA e BSA) foram adotados os subscritos i e s (que significam incidente e espalhado) para a convenção FSA e os subscritos t e r (que significam transmitido e recebido) para a convenção BSA. Deve-se, contudo, ter em mente que os sistemas de coordenadas i e t são, na verdade, idênticos.

Na convenção FSA, considerando um espalhador iluminado por uma onda eletromagnética plana, com o campo elétrico incidente dado por E^i :

$$E^i = E_v^i \vec{v}_i + E_h^i \vec{h}_i, \text{ com } \vec{h}_i \text{ e } \vec{v}_i \text{ de acordo com (5) e (6).} \quad (16)$$

A onda incidente cria correntes no espalhador que, em conseqüência, re-irradia a onda. No sistema de coordenadas FSA, os componentes transversais do campo elétrico da onda espalhada, E^s , podem ser escritos como:

$$E^s = E_v^s \vec{v}_s + E_h^s \vec{h}_s \quad (17)$$

Na convenção BSA, os campos elétricos transmitidos e recebidos são expressos na forma:

$$E^t = E_v^t \vec{v}_t + E_h^t \vec{h}_t \quad (18)$$

$$E^r = E_v^r \vec{v}_r + E_h^r \vec{h}_r \quad (19)$$

Com os vetores unitários definidos por (11), (12), (14) e (15).

Comparando as expressões para os sistemas de coordenadas FSA e BSA, torna-se evidente que:

$$E^i = E^t \quad (20)$$

$$E^s = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} E^r \quad (21)$$

Portanto, os campos E^t e E^r se relacionam por intermédio de relação abaixo:

$$E^r = \frac{e^{ik_0 r}}{r} \bar{S} E^t \quad (22)$$

Onde,

$$\bar{S} = \begin{pmatrix} \bar{S}_{vv} & \bar{S}_{vh} \\ \bar{S}_{hv} & \bar{S}_{hh} \end{pmatrix} \quad (23)$$

É a matriz de espalhamento do alvo, definido de acordo com a convenção BSA. A partir das relações (20) e (21) obtém-se a seguinte relação:

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \bar{S} \quad (24)$$

Onde \bar{S} corresponde à matriz de espalhamento no sistema de coordenadas BSA, segundo a notação utilizada por Ulaby and Elachi, 1990.

No caso das aplicações de Sensoriamento Remoto radar, uma onda é transmitida e o seu eco, sinal espalhado por um alvo no solo, retorna à antena de recepção do radar (normalmente, essa antena coincide com a antena de recepção). Isto significa que as ondas transmitida e recebida (retroespalhada), são conhecidas, podendo ser representadas por um vetor (Andrade, 2006).

A transformação do vetor-de-onda transmitido para o vetor-de-onda recebido é uma transformação linear, descrita por uma matriz que contém toda a informação relacionada ao processo de espalhamento (Hellmann, 2001).

Caso a influência da atmosfera na propagação da onda seja desprezada ou corrigida, essa matriz descreve o espalhador no solo. Portanto, essas matrizes são utilizadas na análise e extração de informações dos alvos no solo.

5. As matrizes de espalhamento

Normalmente, são utilizadas duas representações diferentes para os espalhadores. A primeira emprega a matriz de Jones (quando se utiliza o sistema de coordenadas FSA) ou a matriz de Sinclair (quando se utiliza o sistema de coordenadas BSA) e a segunda utiliza a matriz de Stokes (também chamada de matriz de Mueller) ou matriz de Kennaugh, quando são aplicados os sistemas de coordenadas FSA e BSA, respectivamente.

Ambas as representações reproduzem a relação entre os vetores incidentes e a onda espalhada e, portanto, a informação sobre o espalhador (Zebker, 1987).

As matrizes de Jones (FSA) ou de Sinclair (BSA) são utilizadas quando se representa a onda por intermédio do vetor de Jones, enquanto que as matrizes de Mueller (ou de Stokes), no sistema de coordenadas FSA, e a matriz de Kennaugh, no sistema de coordenadas BSA, são utilizadas quando a onda é representada pelos vetores de Stokes ou de Kennaugh, respectivamente (Andrade, 2006).

A **Tabela 1** apresenta um resumo relativo aos vetores utilizados na representação das ondas transmitidas e recebidas por um sensor SAR, assim como sobre as matrizes utilizadas na representação dos alvos. A mesma Tabela mostra relação entre os vetores e as matrizes com os sistemas de coordenadas FSA e BSA.

Tabela 1. Resumo sobre a representação das ondas incidente e espalhada e sobre a caracterização dos alvos.

SISTEMA DE COORDENADAS UTILIZADO	REPRESENTAÇÃO DA ONDA INCIDENTE (TRANSMITIDA) – COMPLETAMENTE POLARIZADA	REPRESENTAÇÃO DO ALVO	REPRESENTAÇÃO DA ONDA ESPALHADA – PARCIALMENTE POLARIZADA
FSA – Forward Scatter Alignment	Vetor de Jones: \vec{J}^i (2×1 complexo)	Matriz de Jones: (T) (2×2 complexa)	Vetor de Jones: \vec{J}^s (2×1 complexo)
BSA – Backscatter Alignment	Vetor de Jones: \vec{J}^t (2×1 complexo)	Matriz de Sinclair: (S) (2×2 complexa)	Vetor de Jones: \vec{J}^r (2×1 complexo)
FSA – Forward Scatter Alignment	Vetor de Stokes: \vec{S}^i (4×1 real)	Matriz de Mueller: (M) (4×4 real) ou Matriz de Stokes (L) (4×4 real)	Vetor de Stokes: \vec{S}^s (4×1 real) ou Matriz de coerência: (J) (2×2 Hermitiana)
BSA – Backscatter Alignment	Vetor de Kennaugh: \vec{k}^t (4×1 real)	Matriz de Kennaugh: (K) (4×4 real)	Vetor de Kennaugh: \vec{k}^r (4×1 real)

Conclusão

Embora existam duas representações equivalentes, FSA e BSA, para os vetores de polarização, a convenção BSA tem a vantagem de representar os sinais transmitidos e recebidos em um único sistema de coordenadas local, uma vez que os sistemas de coordenadas passam a ser coincidentes para os casos em que se utiliza somente uma antena (sistema monoestático).

Esta é a razão pela qual a convenção BSA é preferida para o cálculo do retroespalhamento radar de um dado alvo. Isto simplifica a definição das várias matrizes e relações associadas com a síntese da resposta polarimétrica de alvos simples.

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.
- Hellmann M.P. **SAR Polarimetry Tutorial (Beta version 0.1a)**. [2001]. [on line]. Disponível em: <<http://epsilon.nought.de/tutorials/polSMART/index.php>>. Acesso em: 11 Set. 2006.
- Ulaby, F. and Elachi, C. **Radar Polarimetry for Geoscience Applications**, Artech House, 1990. 364 p.
- Van Zyl, J.J.; Zebker, H.A.; Elachi, C. Imaging Radar Polarization Signatures: Theory and Observation. **Radio Science**, v. 22, p. 529-543, 1987.
- Zebker H.A., van Zyl J.J., Held D.N. Imaging Radar Polarimetry from Wave Synthesis. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, p 683-701, 1987.