

文章编号: 1672-2892(2012)01-0082-06

双站合成孔径雷达去取向极化分析

黎贵玲, 吴霞

(复旦大学 通信科学与工程系, 上海 200433)

摘要: 在分析单站合成孔径雷达去取向参数的基础上, 研究了双站合成孔径雷达的非对称散射矩阵, 利用矩阵代数知识得到双站去取向参数。推导了目标的去取向变换矩阵, 将目标散射矢量进行矢量变换, 使得研究目标具有相同的取向, 目标本身的信息得以凸显。经过去取向变换, 对双站模拟图像的特征参数进行分析, 为进一步解读双站图像提供了初步手段。

关键词: 双站合成孔径雷达; 去取向; 散射矢量变换; 双站极化

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

Deorientation polarimetric analysis of bistatic SAR

LI Gui-ling, WU Xia

(Communication Science and Engineering Department, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The nonsymmetrical scattering matrices of bistatic Synthetic Aperture Radar(SAR) are studied on the basis of the analysis of the monostatic SAR deorientation parameters, and the bistatic deorientation parameters are obtained by using matrix algebra. Deorientation transformation matrix is deduced and the transformation of the target scattering vector is introduced to reduce the influence of randomly fluctuating orientation and make the targets' generic characteristics prominent. The targets' generic characteristics of the simulated bistatic SAR images are analyzed through the transformation in order to provide a rudimentary method for bistatic SAR images.

Key words: bistatic SAR; deorientation; scattering vector transformation; bistatic polarimetry

合成孔径雷达(SAR)技术的发展已有半个多世纪的历史, 由于它具有全天候、全天时工作的特点, 已成为空间遥感和对地监测的重要手段。相对于单站SAR的单一平台, 双站SAR的收发平台分置, 因此能够获得更丰富的方位信息, 作用距离远, 抗干扰性、拦截性和隐蔽性都更好, 已逐渐成为当前SAR研究的热点^[1]。双站SAR极化图像的解译和信息获取尤为关键。Huynen在20世纪六七十年代利用散射矩阵特征分析的方法研究了目标解析^[2]。Cloude等在1997年提出一种基于目标解析参数熵的无监督分类方法, 用Pauli展开和相关矩阵的特征值分析得到目标解析参数 α 和熵 H ^[3-4]。

在极化散射中, 目标的散射信息将受到取向角等因素的影响。复杂地表目标的取向往往是随机分布的, 因此产生的回波也会随机起伏, 使散射目标的特征信息变得模糊。两类本身不同特征、不同取向的目标, 可能产生相类似的散射, 不易区分。对散射信息进行去取向操作, 可以去除目标取向的影响, 更好地凸显目标特性。在单站中, 目标的散射矩阵通常是后向互易的, 可以通过特征值变换使其对角化。在此基础上, Huynen 定义了包括取向角在内的 1 组参数来表征目标的各种特性。本文中, 采用类似的方法得到目标相对于入射平台和接收平台的取向角 ψ_i, ψ_s , 然后从入射波和接收波方向、极化基变换的几何关系出发, 推导出目标的去取向变换矩阵。最后模拟了复杂目标的双站散射信息, 并对其进行去取向处理, 得到相应的极化特征参数。

1 双站去取向角推导

1.1 单站目标特征参数

从麦克斯韦方程出发, 入射电场 E_i 和目标散射电场 E_s 的关系可表示为:

收稿日期: 2011-03-30; 修回日期: 2011-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.41001194)

$$\mathbf{E}_s = \mathbf{S}\mathbf{E}_i \quad (1)$$

式中 \mathbf{S} 为1个 2×2 的矩阵。在单站中， \mathbf{S} 矩阵通常是后向互易的，为厄米共轭阵^[5]。可以采用特征值变换的方法使其对角化：

$$\mathbf{S}_D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} = \mathbf{U}^T \mathbf{S} \mathbf{U}, \quad \mathbf{U} = [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2] \quad (2)$$

式中：上标T表示转置； $\lambda_i, \mathbf{e}_i (i=1,2)$ 为实特征值和复特征矢量。特征值矩阵 \mathbf{U} 是一个酉矩阵，可表示为^[6]：

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_\psi(\psi) \mathbf{U}_\tau(\tau) \mathbf{U}_\nu(\nu) \quad (3)$$

对角阵可进一步表示为：

$$\mathbf{S}_D = m \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \tan^2 \gamma \end{bmatrix} e^{j2\rho} \quad (4)$$

于是得到Huynen用来表示目标特性的1组参数： ψ ：指示目标的取向； τ ：指示目标的非对称性； ν ：指示目标散射过程中的跳跃次数； γ ：指示目标的本质特征； m ：目标的散射截面； ρ ：包含了目标本身及其离开雷达的距离等信息。

1.2 双站目标特征参数

在双站配置中， \mathbf{S} 矩阵不再具有后向互易性，因此不能像在单站中那样简单地使其对角化。但是从数学角度出发，仍可以将 \mathbf{S} 矩阵写成酉矩阵和对角阵的乘积^[7]：

$$\mathbf{S}_D = \begin{bmatrix} \mu_1 & 0 \\ 0 & \mu_2 \end{bmatrix} = \mathbf{U}_s^T \mathbf{S} \mathbf{U}_i \quad (5)$$

式中： $\mathbf{U}_s, \mathbf{U}_i$ 分别为入射和散射所对应的特征值矩阵(为酉矩阵)， \mathbf{S}_D 的对角元为复数。根据式(5)可以得到：

$$\mathbf{S}_D^+ \mathbf{S}_D = (\mathbf{U}_s^T \mathbf{S} \mathbf{U}_i)^+ (\mathbf{U}_s^T \mathbf{S} \mathbf{U}_i) = \mathbf{U}_i^+ \mathbf{S}^+ (\mathbf{U}_s^T)^+ \mathbf{U}_s^T \mathbf{S} \mathbf{U}_i \quad (6)$$

$$\mathbf{S}_D \mathbf{S}_D^+ = (\mathbf{U}_s^T \mathbf{S} \mathbf{U}_i) (\mathbf{U}_s^T \mathbf{S} \mathbf{U}_i)^+ = \mathbf{U}_s^T \mathbf{S} \mathbf{U}_i \mathbf{U}_i^+ \mathbf{S}^+ \mathbf{U}_s^* \quad (7)$$

对于酉矩阵有 $\mathbf{U}^+ = \mathbf{U}^{-1}$ ，且 $\mathbf{S}_D^+ \mathbf{S}_D = \mathbf{S}_D \mathbf{S}_D^+$ ，式(6)~式(7)可以写作：

$$\mathbf{V} = \mathbf{S}_D^+ \mathbf{S}_D = \begin{bmatrix} |\mu_1|^2 & 0 \\ 0 & |\mu_2|^2 \end{bmatrix} = \mathbf{U}_i^{-1} \mathbf{S}^+ \mathbf{S} \mathbf{U}_i = \mathbf{U}_i^{-1} \mathbf{M} \mathbf{U}_i = \mathbf{U}_s^T \mathbf{S} \mathbf{S}^+ \mathbf{U}_s^* = (\mathbf{U}_s^*)^{-1} \mathbf{M}' \mathbf{U}_s^* \quad (8)$$

式中：上标+代表共轭转置；上标*代表共轭。其中， $\mathbf{M} = \mathbf{S}^+ \mathbf{S}$ ， $\mathbf{M}' = \mathbf{S} \mathbf{S}^+$ 。

根据线性代数相似对角化的知识， $|\mu_1|^2, |\mu_2|^2$ 为 \mathbf{M} 和 \mathbf{M}' 的特征值(二者的特征值相等)，分别由 \mathbf{M}, \mathbf{M}' 的线性无关特征向量构成，于是有： $\det(\mathbf{M} - |\mu|^2 \mathbf{I}) = 0$ ，据此可以得到 $\mathbf{U}_i, \mathbf{U}_s$ 。

与单站配置类似，可将双站散射矩阵对角化后进行简化得到 \mathbf{S}_d ，表示为：

$$\mathbf{S}_d = (\mathbf{U}_\psi(\psi_s) \mathbf{U}_\tau(\tau_s) \mathbf{U}_\nu(\nu_s))^T \mathbf{S} \mathbf{U}_\psi(\psi_i) \mathbf{U}_\tau(\tau_i) \mathbf{U}_\nu(\nu_i) \quad (9)$$

于是，得到了双站配置下的Huynen参数。其中 ψ_i, ψ_s 即为相对于入射向和接收向的取向角。

2 双站去取向变换

令电磁波入射方向为 \hat{k}_i ，观测点与目标的连线称为视线，按照相对的概念，极化基绕视线旋转 ψ 角即等效于目标绕视线旋转 $-\psi$ 角。场矢量 $\mathbf{E}_i = [E_{h_i} \ E_{v_i}]^T$ 随极化基 (\hat{h}_i, \hat{v}_i) 绕视线旋转 $-\psi_i$ 角之后，新的极化基为 (\hat{h}'_i, \hat{v}'_i) ，根据几何关系在 (\hat{h}'_i, \hat{v}'_i) 下新的场矢量表示为：

$$\mathbf{E}'_i = [E'_{h_i} \ E'_{v_i}]^T = \mathbf{R}_i \mathbf{E}_i, \quad \mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} \cos \psi_i & \sin \psi_i \\ -\sin \psi_i & \cos \psi_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

在散射方向上，散射极化基为 (\hat{h}_s, \hat{v}_s) 。类似地，可以得到场矢量 $\mathbf{E}_s = [E_{h_s} \ E_{v_s}]^T$ 随极化基 (\hat{h}_s, \hat{v}_s) 绕视线旋转

$-\psi_s$ 角之后在 (\hat{h}_s, \hat{v}_s) 下新的场矢量:

$$\mathbf{E}'_s = \begin{bmatrix} \mathbf{E}'_{h_s} & \mathbf{E}'_{v_s} \end{bmatrix}^T = \mathbf{R}_s \mathbf{E}_s; \mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} \cos \psi_s & \sin \psi_s \\ -\sin \psi_s & \cos \psi_s \end{bmatrix} \quad (11)$$

则此时入射电场矢量 \mathbf{E}'_i 和散射电场矢量 \mathbf{E}'_s 的关系可以写为:

$$\mathbf{E}'_s = \mathbf{R}_s \mathbf{E}_s = \mathbf{R}_s \mathbf{S} \mathbf{E}'_i = \mathbf{R}_s \mathbf{S} \mathbf{R}_i^T \mathbf{E}'_i = \mathbf{S}' \mathbf{E}'_i; \mathbf{S}' = \mathbf{R}_s \mathbf{S} \mathbf{R}_i^T \quad (12)$$

\mathbf{S}' 即为去取向后产生的新的散射矩阵。写出 \mathbf{S}' 的各个元素表达式:

$$\begin{cases} S'_{hh} = \sin \psi_i \sin \psi_s S_{vv} + \cos \psi_i \cos \psi_s S_{hh} + \cos \psi_s \sin \psi_i S_{hv} + \sin \psi_s \cos \psi_i S_{vh} \\ S'_{hv} = \sin \psi_s \cos \psi_i S_{vv} - \cos \psi_s \sin \psi_i S_{hh} + \cos \psi_i \cos \psi_s S_{hv} - \sin \psi_i \sin \psi_s S_{vh} \\ S'_{vh} = \sin \psi_i \cos \psi_s S_{vv} - \cos \psi_i \sin \psi_s S_{hh} - \sin \psi_i \sin \psi_s S_{hv} + \cos \psi_i \cos \psi_s S_{vh} \\ S'_{vv} = \cos \psi_i \cos \psi_s S_{vv} + \sin \psi_i \sin \psi_s S_{hh} - \cos \psi_i \sin \psi_s S_{hv} - \cos \psi_s \sin \psi_i S_{vh} \end{cases} \quad (13)$$

将 2×2 的散射矩阵通过“Pauli”展开进行矢量化, 得到散射矢量:

$$\mathbf{k}_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{hh} + S_{vv} & S_{hh} - S_{vv} & S_{hv} + S_{vh} & jS_{hv} - jS_{vh} \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

目标散射矢量的参数化方便于目标散射矢量的物理解释, Cloude等将 \mathbf{k}_p 参数化为:

$$\mathbf{k}_p = \|\mathbf{k}_p\| \begin{bmatrix} \cos \alpha e^{i\phi_1} & \sin \alpha \cos \beta e^{i\phi_2} & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma e^{i\phi_3} & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma e^{i\phi_4} \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

式中: β 表示目标的取向信息; α 表示目标的散射机制。

于是可得 \mathbf{S}, \mathbf{S}' 对应的Pauli展开目标散射矢量 $\mathbf{k}_p, \mathbf{k}'_p$ 之间满足

$$\mathbf{k}'_p = \Delta(\psi_i, \psi_s) \cdot \mathbf{k}_p \quad (16)$$

式中

$$\Delta(\psi_i, \psi_s) = \begin{bmatrix} \cos(\psi_i - \psi_s) & 0 & 0 & -j \sin(\psi_i - \psi_s) \\ 0 & \cos(\psi_i + \psi_s) & \sin(\psi_s + \psi_i) & 0 \\ 0 & -\sin(\psi_s + \psi_i) & \cos(\psi_i + \psi_s) & 0 \\ j \sin(\psi_s - \psi_i) & 0 & 0 & \cos(\psi_i - \psi_s) \end{bmatrix} \quad (17)$$

单站配置下 $\psi_s = \psi_i$, 式(17)退化为文献[8]中的形式。从上述计算可以看出, 目标散射矢量的 α 参数不再像单站配置下那样具有旋转不变性, 由此可知 α 参数在很大程度上依赖于双站入射和散射角度的设置, 与单站相比, 表征散射目标特性的能力大大减弱。同时 \mathbf{k}_p 的各个分量所表征的能量在各分量之间发生转移, 这与文献[8]中给出的结论是一致的。

3 双站去取向极化分析与讨论

3.1 双站去取向角验证

考虑椭球粒子的散射情况, 如图1所示, 在主坐标系 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 中, 入射方向 \hat{k}_i , 极化基 (\hat{h}_i, \hat{v}_i) , 入射角 (θ_i, φ_i) , 散射方向 \hat{k}_s , 极化基 (\hat{h}_s, \hat{v}_s) , 散射角 (θ_s, φ_s) 。粒子本身坐标轴 $(\hat{x}_b, \hat{y}_b, \hat{z}_b)$ 在主坐标系 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 中Euler角为 (ω, ξ, η) 。此时Rayleigh近似下非球形小粒子散射矩阵各元素为^[9]:

$$\begin{cases} S_{hh} = \frac{3}{2k} \left[T_1(\hat{\varphi}_s \cdot \hat{\varphi}_i) + (T_0 - T_1)(\hat{\varphi}_s \cdot \hat{z}_b)(\hat{z}_b \cdot \hat{\varphi}_i) \right] \\ S_{vv} = \frac{3}{2k} \left[T_1(\hat{\theta}_s \cdot \hat{\theta}_i) + (T_0 - T_1)(\hat{\theta}_s \cdot \hat{z}_b)(\hat{z}_b \cdot \hat{\theta}_i) \right] \\ S_{vh} = \frac{3}{2k} \left[T_1(\hat{\theta}_s \cdot \hat{\varphi}_i) + (T_0 - T_1)(\hat{\theta}_s \cdot \hat{z}_b)(\hat{z}_b \cdot \hat{\varphi}_i) \right] \\ S_{hv} = \frac{3}{2k} \left[T_1(\hat{\varphi}_s \cdot \hat{\theta}_i) + (T_0 - T_1)(\hat{\varphi}_s \cdot \hat{z}_b)(\hat{z}_b \cdot \hat{\theta}_i) \right] \end{cases} \quad (18)$$

式中 z_b 为粒子对称轴的方向, 即局部坐标系的第三轴, 这里考虑椭球粒子为旋转对称, 3个半轴的长度为 a, b, c , 其中 $a=b$; 有关各项可以根据几何关系求得:

$$\begin{cases} T_0 = t_0(1+i \cdot t_0), T_1 = t_1(1+i \cdot t_1) \\ t_0 = \frac{2}{9} k^3 a^2 c (\varepsilon_{sn} - 1) \frac{1}{1 + (\varepsilon_{sn} - 1) g_c} \\ t_1 = \frac{2}{9} k^3 a^2 c (\varepsilon_{sn} - 1) \frac{1}{1 + (\varepsilon_{sn} - 1) g_a} \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} g_a = \frac{1}{2}(1 - g_c) \\ g_c = -\frac{a^2}{c^2 e^2} \left[1 - \frac{1}{2e} \ln \frac{1-e}{1+e} \right], e = \sqrt{1 - \frac{a^2}{c^2}} \end{cases} \quad (20)$$

式中 ε_{sn} 为复介电常数。由此可以建立双站去取向角 ψ_i, ψ_s 与双站配置角 β 的关系。为了计算简单，使散射粒子与坐标系的关系如图2所示($\theta_i = \theta_s = 90^\circ, \varphi_i = 0^\circ, \varphi_s$ 随 β 变化)， ψ_i, ψ_s 即为椭球粒子在入射和散射波平面中的投影与 xoy 平面的夹角。将仿真参数设置为： $f=1.25$ GHz, $\varepsilon_s=22.5+7.5i, a=0.1$ cm, $c=3$ cm, $\zeta=60^\circ, \eta=90^\circ$ 。仿真结果如图3所示，双站配置角为 0° 时，双站退化为单站模式，入射和散射去取向角一致： $\psi_i = \psi_s = 30^\circ$ 。随着 β 增大，由于入射波平面没有变化，因此入射去取向角基本没有变化，但是散射波平面随 β 进行旋转，因此散射去取向角相应变化。 β 变为 90° 时，散射去取向角变为 90° ，这与图2给出的物理现象是一致的。

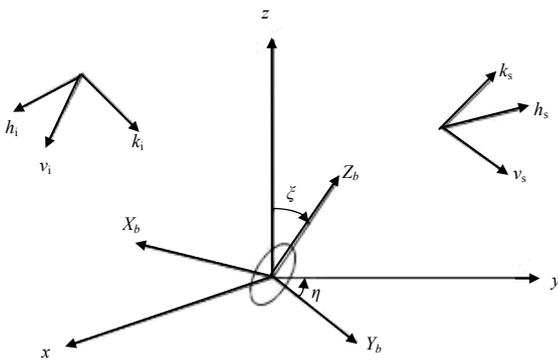


Fig.1 Geometry in the global coordinate
图1 椭球粒子散射坐标系

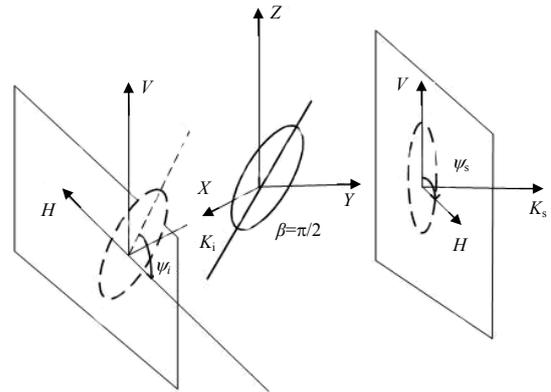


Fig.2 Relationship among the target and the incident and scattering wave planes
图2 椭球粒子与入射和散射平面的关系

进一步讨论去取向角与复介电常数的模 $|\varepsilon_s|$ 的关系。按照前文设置，理论上后向散射时的去取向角为 30° ，研究取不同双站配置角 β 时，去取向角与理论值的差值 $\Delta\psi_i, \Delta\psi_s$ 与 $|\varepsilon_s|$ 关系(见图4)。可以发现，后向散射时即单站配置下，去取向角与以往的研究符合，不受 $|\varepsilon_s|$ 的影响，但是随着 β 的增大，去取向角开始受到 $|\varepsilon_s|$ 的影响，双站配置角越大，这种影响越明显。当 $|\varepsilon_s|$ 较小时，观察较为直观的入射取向角，其值不再与单站配置时一致，而理想情况认为应该是一致的。随着 $|\varepsilon_s|$ 的增大，去取向角与理想情况逐渐符合。因此，可进一步认为前述去取向角的推导受到研究对象介电常数的影响，具有一定的局限性。如何更好地分离取向信息，将是本文进一步研究的内容。

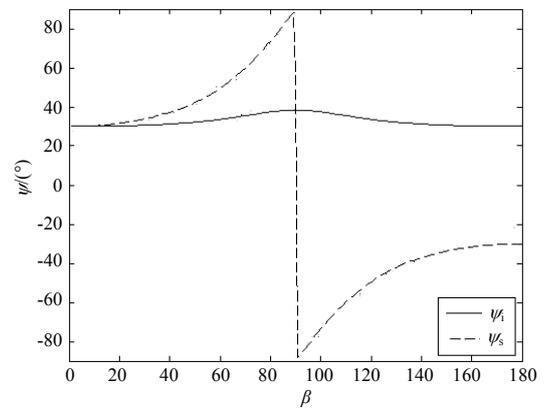


Fig.3 Relationship among ψ_i, ψ_s and β
图3 取向角 ψ_i, ψ_s 与双站配置角 β 的关系

3.2 极化散射信息分析

首先采用MPA算法^[10-11]模拟一个包含土壤、树木和建筑物的典型自然场景的双站图像，然后进行地物极化特征分析。参数设置为：入射角为 $(46^\circ, 15^\circ)$ ，散射角为 $(28^\circ, 150^\circ)$ 。具体参数如表1和表2所示，双站模拟图像如图5所示。

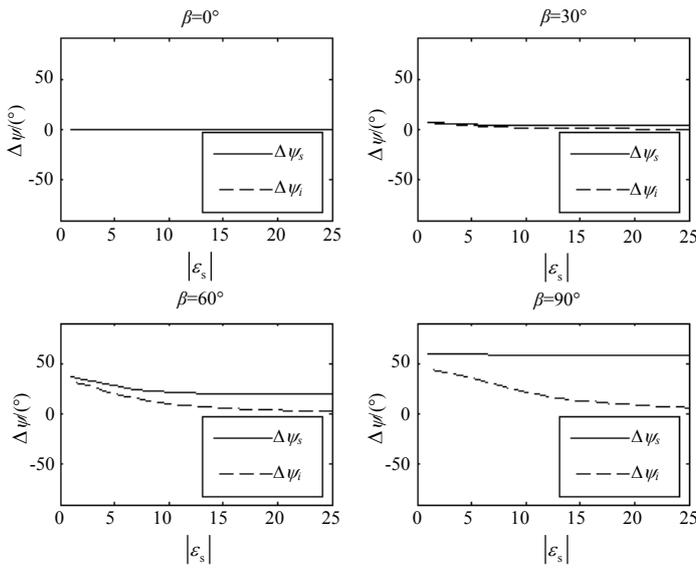


Fig.4 Relationship among $\Delta\psi$, $\Delta\psi_s$ and $|\epsilon_s|$

图4 差值去取向角 $\Delta\psi_s, \Delta\psi$ 与 $|\epsilon_s|$ 的关系

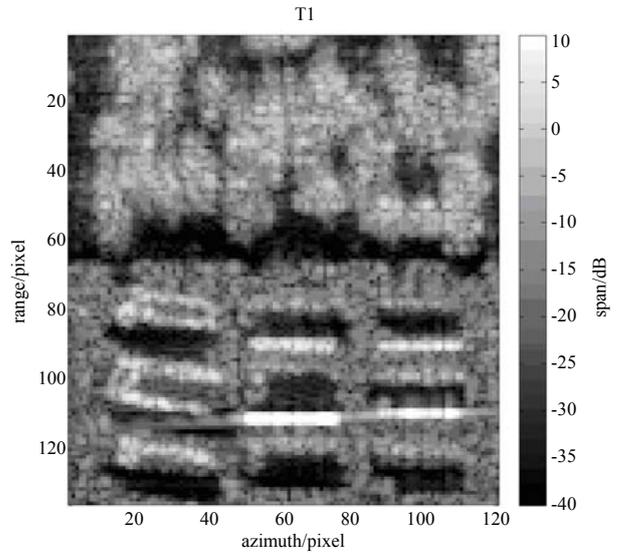


Fig.5 Simulated bistatic image

图5 模拟双站图像

未经多视处理或空域平均的极化SAR图像的每个像素就是一个散射矩阵 S ，包含 $S_{hh}, S_{hv}, S_{vh}, S_{vv}$ 4个极化分量，经过Pauli分解可以得到散射矢量 k_p 。进一步经过多视处理或平均(这里采用 3×3 的窗口进行空域多视平均处理)，得到相干矩阵：

$$T = \langle k_p \cdot k_p^+ \rangle \quad (21)$$

在单站情况下， k_p 的第4个分量 $k_{p,4}$ 为零， T 退化为 3×3 维，此时 α 从 $0^\circ \rightarrow 45^\circ \rightarrow 90^\circ$ ，分别表征散射机制从面散射到体散射，再到二次散射。在一般平飞斜视(TI)情况下，根据本文第2部分的分析， α 可能丢失表现地物极化特性的能力，此时极化信息量可能会转移到其他角度上，比如Cloude定义的 β, γ 等。

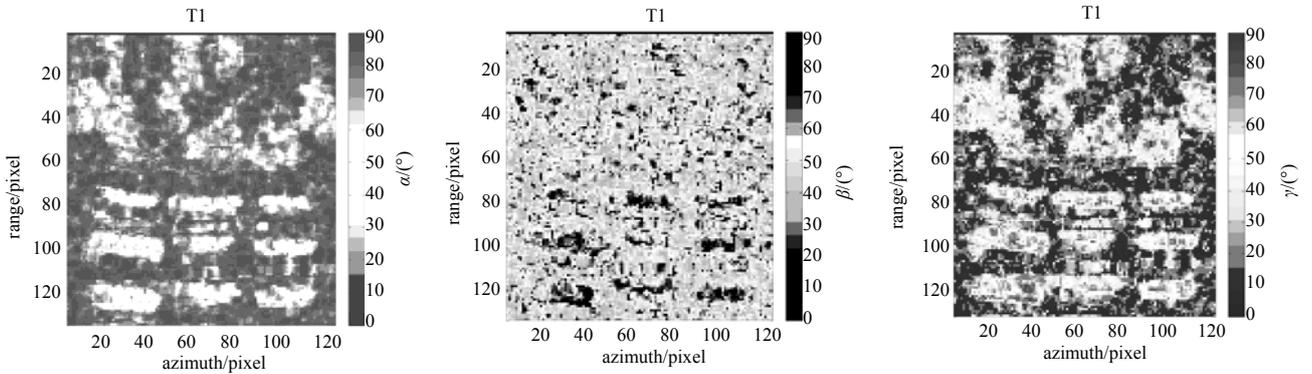


Fig.6 α, β, γ after deorientation(TI configuration)

图6 去取向变换后 TI 配置下的双站 SAR 图像的 α, β, γ 参数

表1 平台与雷达参数设置

Table1 Parameters of platforms and sensors simulation

platform position/m	pulse width/ μ s	band width/MHz	sampling rate/MHz	PRF/Hz	range resolution/m	azimuth resolution/m	carrier frequency/GHz	craft velocity/($m \cdot s^{-1}$)	synthetic aperture/m
Rx:(-800,1 400,3 000) Tx:(800,3 000,3 000)	5	150	180	120	1	1	5.31	100	≈ 102

表2 地物参数模型设置

Table2 Parameters of scattering models

soil surface	road surface	building			needle leaf tree		
		wall	roof	size	leaf	trunk	trunk
$h=0.57$ cm	$h=0.10$ cm	$h=0.08$ cm	$h=0.20$ cm	length:25m width:8 m	length:6.0cm,radius:0.1cm	ellipsoid-like	length:4 m,
$L=6.0$ cm	$L=4.0$ cm	$L=10.0$ cm	$L=8.0$ cm	height 8 m	$\epsilon_s = 19.6+8.7i$	radius:2.5 m-4m	radius:0.2 m,
$\epsilon_s=8+1i$	$\epsilon_s=3+0.05i$	$\epsilon_s=3+0.05i$	$\epsilon_s=7+0.1i$	roof height:2.5 m	orientation[0,80];[0-360], fractional volume 0.001	height:10 m-16 m	$\epsilon_s = 13.1+4.1i$

对散射图像作去取向变换,分离取向信息,图6给出了去取向变换后的 α, β, γ 参数。经过变换 γ ,图像上的地物差异变得相对清晰, γ 分布与单站配置下的 α 参数(图7)非常接近,植被区 $\gamma \rightarrow 45^\circ$,建筑物二次散射 $\gamma \rightarrow 90^\circ$,这为重新定义双站极化特征参数和双站图像解译提供了一个新的初步手段。

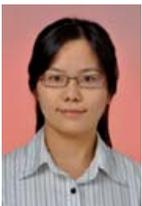
4 结论

本文利用矩阵代数的知识对双站散射矩阵进行矩阵变换,得到了目标的入射与散射去取向角。仿真结果表明,双站去取向角受到散射目标自身特性的影响,具有一定的局限性,这需要进一步深入研究。将单站配置下的去取向分析理论方法扩展到双站模式下,通过矢量变换,去除目标取向对散射的影响。通过对模拟双站图像进行去取向极化分析,发现进行去取向操作后,原来参数图上不清晰的地物差异变得更为清晰,为进一步研究双站极化图像提供了另一初步手段。

参考文献:

- [1] 汤子跃,张守融. 双站合成孔径雷达系统原理[M]. 北京:科学出版社, 2003. (TANG Ziyue,ZHANG Shourong. Theory of Bistatic Synthetic Aperture Radar System[J]. Beijing:Science Press, 2003.)
- [2] Huynen J R. Phenomenological Theory of Radar Targets[D]. Delft,Netherlands: University of Technology, 1970.
- [3] Cloude S R,Pottier E. An entropy based classification scheme for land application of polarimetric SAR[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1997,35(1):68-78.
- [4] 陈体刚,李彦佐. 全极化 SAR 图像中相干矩阵特征值及其应用[J]. 信息与电子工程, 2005,3(3):161-166. (CHEN Ti gang,LI Yanzuo. Coherent Matrix Eigenvalue and Eigenvalue Index of Polarimetric SAR Images and its Application of Bayes Classification[J]. Information and Electronic Engineering, 2005,3(3):161-166.)
- [5] Cloude S R,Papathanassiou K P,Pottier E. Radar polarimetry and polarimetric interferometry[J]. IEICE Trans. Electron., 2001,E84-C(12):1814-1822.
- [6] Cloude S R. Group theory and polarization algebra[J]. OPTIK, 1986,75(1):26-36.
- [7] Davidovitz M,Boerner W M. Extension of Kennaugh's optimal polarization concept to asymmetric scattering matrix case[J]. IEEE Trans. Antennas Propag., 1986,34(4):569-574.
- [8] XU Feng,JIN Yaqiu. Deorientation Theory of Polarimetric Scattering Targets and Application to Terrain Surface Classification[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2005,43(10):2351-2364.
- [9] 金亚秋. 电磁散射和热辐射遥感理论[M]. 北京:科学出版社, 1993. (JIN Yaqiu. Remote Sensing Theory of Electromagnetic Scattering and Thermal Emission[M]. Beijing:Science Press, 1993.)
- [10] JIN Y Q,XU Feng. Polarimetri BISAR Image Simulation and Analysis[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Symposium, 2008,3:605-608.
- [11] 张兰. 软件的可靠性设计和检查[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2007,25(5):33-36. (ZHANG Lan. Design and Test of Software Reliability[J]. Electronic Product Reliability and Environment Testing, 2007,25(5):33-36.)

作者简介:



黎贵玲(1983-),女,四川广安人,在读硕士研究生,研究方向为双站SAR图像处理、极化信息分析等.email:061021018@fudan.edu.cn.

吴霞(1982-),女,江苏海门人,博士后,主要研究方向为电磁学等。

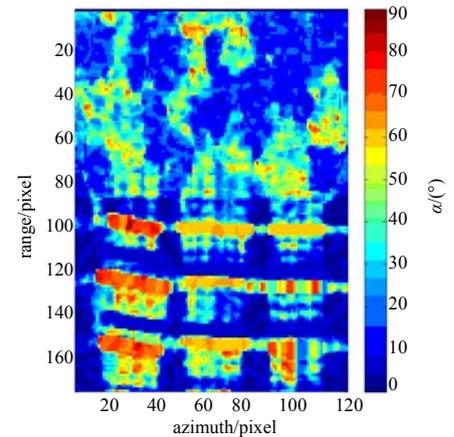


Fig.7 Parameter α (monostatic SAR)
图7 单站配置下的 α 参数