

基于功率迁移的极化 SAR 五分量散射分解方法

刘宇轩, 付海强, 朱建军

中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083

摘要: 基于散射模型的极化分解方法求解简单、物理意义明确, 因而被广泛应用, 但易受到散射场景中去极化效应的影响。已有研究主要通过极化取向角补偿 POAC (Polarimetric Orientation Angle Compensation) 恢复目标的反射对称性, 消除去极化影响, 从而提升分解方法的普适性与准确性。然而, POAC 是从几何层面恢复地物目标的反射对称状态, 在复杂场景下的应用效果有限, 并且对于散射机制间的变化缺乏合理解释。为此, 本文将 POAC 重新解释为不同散射机制间的功率迁移过程, 通过酉矩阵旋转将散射信号恢复至反射对称状态, 并在此基础上构建五分量分解模型, 以提升复杂场景下的散射机制识别能力。基于 ALOS-2 和 E-SAR 全极化数据的验证实验表明, 该方法能够有效恢复地物目标集合的反射对称性, 降低去极化影响, 并实现对于场景散射功率的合理分配。

关键词: 极化 SAR, 相干矩阵, 极化分解, 极化取向角, 酉变换, 功率迁移, 去极化

中图分类号: P237/P2

引用格式: 刘宇轩, 付海强, 朱建军. 2025. 基于功率迁移的极化 SAR 五分量散射分解方法. 遥感学报, 29(12): 3692-3705

Liu Y X, Fu H Q and Zhu J J. 2025. Power-Transfer-Based Five-Component Scattering Decomposition for Polarimetric SAR. National Remote Sensing Bulletin, 29(12): 3692-3705 [DOI: 10.11834/jrs.20255144]

1 引言

基于散射模型的极化目标分解方法已被广泛用于极化合成孔径雷达 PolSAR (Polarimetric Synthetic Aperture Radar) 影像解译, 在可解释性上有着明显的优势。自 Freeman-Durden 分解方法 (以下简称 FDD) 提出以来 (Freeman 和 Durden, 1998), 这类方法取得了显著进展 (Zou 等, 2015; Xiang 等, 2015; Xie 等, 2018; Han 等, 2022; Chen 等, 2024)。FDD 主要用于描述自然场景下满足反射对称性假设的目标散射过程, 通过将测量的协方差矩阵强制转换为反射对称性形式, 分解出不同散射机制对应的散射能量 (An 和 Lin, 2020)。尽管 FDD 取得了较好的分解效果, 但在考虑倾斜地表所引起的去极化现象时, 上述强制转换会使得原本属于表面散射或二面角散射的功率被错误地分配给体散射, 从而导致分解结果中体散射功率过高估计和负功率问题, 使分解结果失去物理意义

(An 等, 2011; Cui 等, 2014)。An 和 Lin (2019) 提出利用两类酉变换消除相干矩阵中的 T_{23} 项, 在获取体散射贡献之后, 将剩余散射矩阵分解为两个秩为 1 的矩阵, 并将其旋转至反射对称形式, 构造出新的散射矩阵以解决上述问题。然而, 该方法在处理过程中消除了 T_{23} 的虚部信息, 同时将 T_{13} 的能量转移至 T_{12} , 导致 T_{13} 的虚部未被有效解译, 进而造成极化信息损失, 不利于对散射目标的几何及物理属性进行深入解译。

针对倾斜地表发生的去极化现象, Lee 等 (2000) 提出通过圆极化信号估计目标的 POA (Polarization Orientation Angle), 从目标几何结构的角度对去极化现象进行补偿。具体而言, POAC (POA Compensation) 通过将目标在极化平面上的投影——散射矩阵, 垂直于雷达 LOS (Line of Sight) 反向旋转 POA 角度, 以恢复目标的反射对称性。结果表明, 在极化平面上旋转散射矩阵的方法能够有效补偿去极化效应, 降低分解结果中

收稿日期: 2025-05-06; 预印本: 2025-09-03

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42227801, 42574048)

第一作者简介: 刘宇轩, 研究方向为极化 SAR 数据处理。E-mail: yuxuanliu@csu.edu.cn

通信作者简介: 付海强, 研究方向为极化干涉 SAR 数据处理。E-mail: haiqiangfu@csu.edu.cn

体散射功率的过高估计，并降低负功率结果的比例（An 等，2011）。然而，POAC 所采用的旋转矩阵无法作用于与表面散射相关的 T_{11} 项，其数值保持不变（Lee 和 Ainsworth，2011），这与 POAC 旨在修正地形坡度所造成的去极化效应，增强表面散射功率的预期相悖，表明其未能充分解释散射过程。此外，POAC 也被认为能够补偿城区旋转建筑物造成的去极化问题（Kimura，2008）。然而，Chen 等（2013）分析了 POAC 在旋转建筑物区域的应用效果，发现 POAC 无法完全恢复旋转建筑物的反射对称状态，POA 与建筑物实际的取向角偏差较大。此外，相比于自然散射背景，城区复杂散射场景的分辨率单元内常包含多种目标的耦合散射信号，难以从单个目标几何结构变换的层面来解释 POAC。总的来说，POAC 在揭示散射机制的变化方面还存在一定局限性。

基于上述问题，本文从功率迁移的角度对 POAC 的物理意义进行解释，将其视为通过酉变换实现散射功率在不同通道间迁移的过程。在此基础上，改进 POAC 的酉变换框架，使用两类酉矩阵对相干矩阵进行旋转，通过功率迁移将散射信号变换至反射对称形式，从而恢复场景内目标集合的反射对称状态。本文进而发展出一种五分量分解方法，该方法旨在进一步深入理解目标的极化信息，提高复杂场景下对散射机制的识别能力，以期为极化 SAR 信息提取提供新的理论和实践支持。

2 散射功率分解方法

在雷达系统照射下的地物散射特性通常用散射矩阵 S 表示（Lee 和 Pottier，2009）：

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中，各量符号表示不同极化方式组合下的后向散射系数，下角标表示极化组合方式。

为了深入理解目标的散射性质，通常需要在散射矩阵的基础上构建散射信息的二阶统计量。在多视 PolSAR 影像中，常使用相干矩阵表示各像元，该矩阵是一个 3×3 的非负正定厄米矩阵：

$$T = \langle \mathbf{k}_p \mathbf{k}_p^* \rangle = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， $\mathbf{k}_p$ 表示 Pauli 矢量，上标 $*$ 表示共轭转置，

$\langle \rangle$ 表示平均操作，Pauli 矢量的定义如下：

$$\mathbf{k}_p = [k_1 \quad k_2 \quad k_3]^T = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH} + S_{VV} \\ S_{HH} - S_{VV} \\ 2S_{HV} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Pauli 分解将极化散射信息投影到 Pauli 矢量的 k_1 、 k_2 、 k_3 元素上，一般认为这 3 个元素分别对应于表面散射、二面角散射和体散射 3 类典型散射机制（Huynen，1978）。

2.1 Pauli 矢量元素散射功率迁移

受到地表粗糙度的影响，SAR 信号会产生严重的去极化现象。为了减少这一现象对极化 SAR 信号解译的影响，POAC 方法被提出（Lee 等，2000）。图 1 为不同倾斜表面上的雷达入射几何示意图。

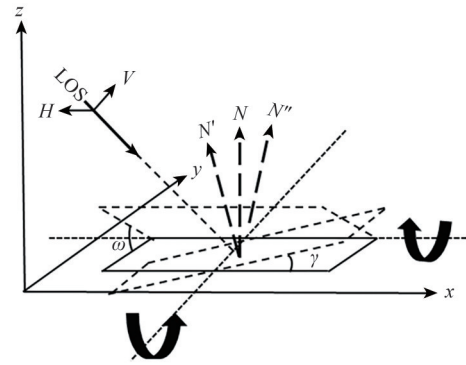


图 1 倾斜表面雷达入射几何示意图

Fig. 1 Schematic of radar incidence geometry on inclined surfaces

图 1 中， γ 表示方位向倾斜角， ω 表示斜距向倾斜角， x 是雷达方位向， N 是平面法线， N' 是平面方位向倾斜后的法线， N'' 是平面斜距向倾斜后的法线，LOS 表示雷达视线方向。

倾斜表面往往包含了方位向和斜距向上的倾斜，极化取向角 θ 为将入射平面 (y, z) 绕 LOS 旋转到倾斜表面法线的角度。POAC 就是在垂直于 LOS 的极化平面上，将散射矩阵沿反方向旋转 POA，从而将目标还原至反射对称性状态。散射矩阵的旋转变换如下式：

$$S' = R S R^T \quad (4)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中， S' 是旋转后的新散射矩阵， R 是二维旋转矩阵。在相干矩阵中，这一旋转变换等效于：

$$T' = \langle U \mathbf{k}_p \mathbf{k}_p^* U^* \rangle \quad (6)$$

式中, T' 是酉变换后的新相干矩阵, U 是三维酉变换矩阵, 在这里的形式为 U_θ , 如下所示:

$$U_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & -\sin 2\theta \\ 0 & \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

POAC 通过将目标恢复至反射对称性状态, 使得散射功率分解结果更加合理, 并使得分解方法能够适用于更多场景。但在密集建筑物场景中, 受限复杂的传播路径与多种散射信号的耦合, POAC 方法难以将建筑物目标有效旋转回正交状态。此外, 受限 POAC 所采用的旋转矩阵维度, Lee 和 Ainsworth (2011) 分析了山地区域 POAC 处理后相干矩阵各元素的变化, 发现与二面角散射机制相关的 T_{22} 功率增加, 与体散射相关的交叉散射项 T_{33} 减少, 而与表面散射相关的 T_{11} 保持不变。然而, 对倾斜表面进行去极化补偿后, 应当预期表面散射机制的功率得到增强。因此, 有必要从新的角度重新审视 POAC, 并给出合理解释。

POAC 的原理可以在 Pauli 矢量空间中进行描述, Cloude 和 Pottier (1996) 将 Pauli 矢量以下述形式表达 (Xu 和 Jin, 2005):

$$\mathbf{k}_p = \|\mathbf{k}_p\| \begin{bmatrix} \cos \alpha e^{j\phi_1} \\ \sin \alpha \cos \beta e^{j\phi_2} \\ \sin \alpha \sin \beta e^{j\phi_3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, $\|\cdot\|$ 表示矢量的模, 角度 α 、 β 表示 $\mathbf{k}_p$ 元素间的相对关系, 角度 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 表示各元素的相位。POAC 后, $\mathbf{k}_p$ 将转化为以下形式:

$$\mathbf{k}'_p = U_\theta \mathbf{k}_p = \|\mathbf{k}_p\| \begin{bmatrix} \cos \alpha e^{j\phi_1} \\ \sin \alpha (\cos 2\theta \cos \beta + \sin 2\theta \sin \beta e^{j(\phi_3 - \phi_2)}) e^{j\phi_2} \\ \sin \alpha (-\sin 2\theta \cos \beta + \cos 2\theta \sin \beta e^{j(\phi_3 - \phi_2)}) e^{j\phi_2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

从式 (9) 中可以发现, POAC 改变了 k_2 、 k_3 的幅度大小, 即两者间的相对关系, 可以将其理解为 POAC 使得散射功率在 k_2 、 k_3 之间实现了迁移。为了还原目标的反射对称性并减少去极化散射功率, 功率通常由体散射 (k_3) 向二面角散射 (k_2) 迁移。将这一功率迁移过程推广至相干矩阵, 通过酉矩阵 U_θ 对相干矩阵进行变换——即式 (6), 就可以实现散射功率在相干矩阵元素之间的转移, 从而得到反射对称形式的相干矩阵。

基于这一思路, 本文利用功率迁移对极化 SAR 散射信号进行解译: 通过酉变换, 在保持总散射功率不变的前提下, 调整相干矩阵各元素间的功率分布, 降低交叉极化散射项, 从而恢复分辨率单元内目标集合的反射对称性。实际上, 酉变换就是对 Pauli 矢量的一种旋转操作。由于 Pauli 矢量的各分量与典型散射机制 (表面、二面角、体散射机制) 之间存在明确的物理关联, 酉变换本质上实现了不同散射机制之间功率的迁移。因此, POA 可以被理解为描述散射功率在不同机制间迁移程度的参数, 上述过程中的 θ 角便具体表征了功率在 k_2 、 k_3 之间的迁移程度。

与 POAC 通过极化空间旋转以补偿目标方位的影响不同, 极化功率迁移过程通过调整功率的分布, 使得原本由于结构混合或方位不对称造成的去极化效应得到缓解。例如, 建筑物在未正对 LOS 方向时, 其典型的二面角散射功率会部分扩散到体散射通道中, 通过酉矩阵 U_θ 进行变换, 就可以将其重新恢复至反射对称形式。同理, 在山地或植被这类自然场景中, 体散射功率部分源于地面起伏或表面粗糙性, 通过功率迁移, 可以将其投影回表面散射。这体现出了功率迁移的优势: POAC 包含一类酉变换, 是从几何上还原散射目标的尝试, 而功率迁移则包含两类酉变换, 能够实现功率在不同散射机制间的流动, 从而还原目标集合的反射对称状态。用 φ 角来表示上述这类将散射功率由体散射 (k_3) 迁移至表面散射 (k_1) 的过程所对应的 POA, 其旋转酉矩阵 U_φ 如下所示:

$$U_\varphi = \begin{bmatrix} \cos 2\varphi & 0 & -\sin 2\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin 2\varphi & 0 & \cos 2\varphi \end{bmatrix} \quad (10)$$

与先前相同, 可以将这一过程视为在 Pauli 矢量空间中, 保持 k_2 不变, 使得功率在 k_1 与 k_3 间迁移。重新将 Pauli 矢量表达为

$$\mathbf{k}_p = \|\mathbf{k}_p\| \begin{bmatrix} \sin \gamma \cos \rho e^{j\phi_1} \\ \cos \gamma e^{j\phi_2} \\ \sin \gamma \sin \rho e^{j\phi_3} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, 角度 γ 、 ρ 表示 $\mathbf{k}_p$ 元素间的相对关系, 角度 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 表示各元素的相位。将酉矩阵 U_φ 乘以 $\mathbf{k}_p$ 便实现了功率的迁移, 结果见式 (12), 这一过程在 Pauli 空间中的示意如图 2。

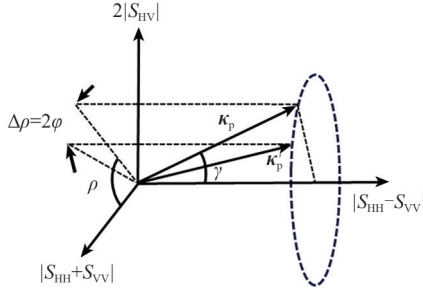

 图2 k_1 与 k_3 在 Pauli 空间中的功率迁移示意图

 Fig. 2 Schematic diagram of power transfer between k_1 and k_3 in Pauli space

$$k'_p = U_\varphi k_p = \begin{bmatrix} \sin \gamma (\cos 2\varphi \cos \rho + \sin 2\varphi \sin \rho e^{j(\phi_3 - \phi_1)}) e^{j\phi_1} \\ \cos \gamma e^{j\phi_2} \\ \sin \gamma (-\sin 2\varphi \cos \rho + \cos 2\varphi \sin \rho e^{j(\phi_3 - \phi_1)}) e^{j\phi_1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

2.2 散射功率迁移顺序及 POA 求解

散射功率迁移需要对主导散射机制进行识别，从而确定迁移顺序。观察式 (9)，可以发现表示表面散射机制的 k_1 仅与 α 角相关，也就是说 α 角的大小决定了 k_1 的大小。事实上，在 $H/\bar{\alpha}$ 分解方法中，平均 α 角 $\bar{\alpha}$ 是识别主导散射机制的一类关键参数，通过判断 $\bar{\alpha}$ 的大小，便能判断出主导散射机制的类型 (Lee 和 Pottier, 2009)。根据二维 $H/\bar{\alpha}$ 平面准确性下的情况，可以得到不同 $\bar{\alpha}$ 角的大小下的功率迁移变换顺序如下：

$$T' = \begin{cases} U_\theta T U_\theta^*, & \bar{\alpha} > 47.5^\circ \\ U_\varphi U_\theta T U_\theta^* U_\varphi^*, & 45^\circ < \bar{\alpha} \leq 47.5^\circ \\ U_\theta U_\varphi T U_\varphi^* U_\theta^*, & 42.5^\circ < \bar{\alpha} \leq 45^\circ \\ U_\varphi T U_\varphi^*, & \bar{\alpha} \leq 42.5^\circ \end{cases} \quad (13)$$

式中，当 $\bar{\alpha} > 47.5^\circ$ 时，二面角散射占主导，功率由体散射迁移至二面角散射；当 $\bar{\alpha} \leq 42.5^\circ$ 时，表面散射占主导，功率由体散射迁移至表面散射；当 $45^\circ < \bar{\alpha} \leq 47.5^\circ$ 时，二面角散射略占优势，先通过 U_θ 将功率由体散射迁移至二面角散射，再通过 U_φ 将剩余功率分配给表面散射；当 $42.5^\circ < \bar{\alpha} \leq 45^\circ$ 时，表面散射略占优势，因此先通过 U_φ 将功率由体散射迁移至表面散射，再通过 U_θ 将剩余功率分配至二面角散射。

在散射功率迁移过程中，为了实现功率由交叉极化项向其他相干矩阵元素的迁移，需要求得能够使得交叉极化项功率最小的 POA。

第 1 种与第 4 种功率迁移过程的 POA 求取方法与 POAC 的相同 (Xu 和 Jin, 2005)。以功率迁移过程 $U_\theta T U_\theta^*$ 为例，使用 U_θ 矩阵对相干矩阵进行酉变换，得到相干矩阵交叉极化项如下所示：

$$T'_{33} = T_{33} \cos^2 2\theta + T_{22} \sin^2 2\theta - \text{Re}(T_{23}) \sin 4\theta \quad (14)$$

式中， T_{33} 表示迁移前的交叉极化项， T'_{33} 则为迁移后的交叉极化项。

通过对 T'_{33} 进行求导并取零，便可以得到使得交叉极化项功率最小的 θ 的表达式。值得注意的是，为了得到正确的结果，还必须对 T'_{33} 二阶导的正负进行判断，否则导出的 POA 无法使得交叉极化项最小 (Chen 等, 2013)， θ 的表达式如下：

$$\tan 4\theta = \frac{2\text{Re}(T_{23})}{T_{22} - T_{33}} \quad (15)$$

$$\theta = \frac{1}{4} \left(\tan^{-1} \frac{2\text{Re}(T_{23})}{T_{22} - T_{33}} \pm n\pi \right) \quad (16)$$

功率迁移过程 $U_\varphi T U_\varphi^*$ 与上述过程类似，可以得到 φ 的表达式如下：

$$\tan 4\varphi = \frac{2\text{Re}(T'_{13})}{T'_{11} - T'_{33}} \quad (17)$$

$$\varphi = \frac{1}{4} \left(\tan^{-1} \frac{2\text{Re}(T'_{13})}{T'_{11} - T'_{33}} \pm n\pi \right) \quad (18)$$

剩余两种功率迁移的情况需要另外考虑，以功率迁移过程 $U_\varphi U_\theta T U_\theta^* U_\varphi^*$ 为例，可以首先将两个酉变换矩阵叠加为矩阵 R ：

$$R = U_\varphi U_\theta \quad (19)$$

则迁移后的相干矩阵交叉极化项可以表示为

$$T'_{33} = e_3 R T R^T e_3^T = (R e) \text{Re}(T) (R e)^T = v^T \text{Re}(T) v \quad (20)$$

式中， $\text{Re}(T)$ 表示 T 的实部矩阵，由于酉变换矩阵完全是实数的，因此直接对 T 取实部并不会改变二次型的数值，并能够使得后续得到的最优方向落在实空间内。 e_3 是标准基向量， v 表示 e_3 经过旋转矩阵作用后的向量：

$$e_3 = [0 \ 0 \ 1] \quad (21)$$

$$v = R^T e_3^T = \begin{bmatrix} \cos 2\theta \sin 2\varphi \\ \sin 2\theta \\ \cos 2\theta \cos 2\varphi \end{bmatrix} \quad (22)$$

最小化交叉极化项功率的问题现在便转化为：在所有 $\|v\| = 1$ 的实向量上，最小化二次型 $v^T \text{Re}(T) v$ 。考虑到 $\|v\| = 1$ 的约束，引入拉格朗日乘子，构造如下：

$$L(\mathbf{v}, \lambda) = \mathbf{v}^T \text{Re}(\mathbf{T}) \mathbf{v} - \lambda(\mathbf{v}^T \mathbf{v} - 1) \quad (23)$$

对 $\mathbf{v}$ 和 λ 求偏导并令其为零, 得到:

$$\text{Re}(\mathbf{T}) \mathbf{v} = \lambda \mathbf{v}, \quad \mathbf{v}^T \mathbf{v} = 1 \quad (24)$$

观察式 (24) 可以发现: 驻点为 $\text{Re}(\mathbf{T})$ 的特征对, 驻点值即对应特征值。实际上, 根据瑞利商定理, 在单位球面上, 二次型的极小值就是矩阵 $\text{Re}(\mathbf{T})$ 的最小特征值, 所有驻点中最小的 λ 就是 $\lambda_{\min}$, 对应的方向即最优 $\mathbf{v}_{\min}$ 。由此, 令 $\mathbf{v} = \mathbf{v}_{\min}$ 可得两个 POA 的解:

$$\begin{cases} \varphi = \frac{1}{2} \sin^{-1} v_1 \\ \theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{v_2}{v_3} \right) \end{cases} \quad (25)$$

式中, v_1 、 v_2 、 v_3 分别是 $\mathbf{v}_{\min}$ 的分量。

同理可得到功率迁移过程 $\mathbf{U}_\theta \mathbf{U}_\varphi \mathbf{T} \mathbf{U}_\varphi^* \mathbf{U}_\theta^*$ 的 POA 解为

$$\begin{cases} \theta = \frac{1}{2} \sin^{-1} v_2 \\ \varphi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{v_1}{v_3} \right) \end{cases} \quad (26)$$

2.3 散射模型及解

2.3.1 PT5SD

在上述理论的基础上, 为了更好地理解目标极化信息, 提高复杂场景下散射机制的识别能力, 本文提出了一种基于功率迁移的五分量分解方法 PT5SD (power-transfer-based five-component scattering power decomposition)。

首先需要关注的是相干矩阵元素 $\text{Im}(T'_{13})$ 和 $\text{Im}(T'_{23})$, 其表达式如下:

$$\text{Im}(k_1 k_3^*) = \sin^2 \beta \cos \alpha \sin \alpha \sin(\phi_1 - \phi_3) \quad (27)$$

$$\text{Im}(k_2 k_3^*) = \sin^2 \alpha \cos \beta \sin \beta \sin(\phi_2 - \phi_3) \quad (28)$$

观察式 (27) 和 (28), 可以发现这两个虚部的大小与功率迁移西变换无关, 并且其中分别包含与去极化程度相关的 Pauli 矢量元素间的相位差信息。为了充分利用这一信息, 需要对这两个相干矩阵元素分别进行物理建模。 $\text{Im}(T_{23})$ 常与城区的螺旋散射机制联系起来, 螺旋散射模型如下:

$$\mathbf{T}_h = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \pm j \\ 0 & \mp j & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

针对 $\text{Im}(T'_{13})$, Singh 和 Yamaguchi (2018) 提出了复合偶极子模型:

$$\mathbf{T}_{\text{cd}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \pm j \\ 0 & 0 & 0 \\ \mp j & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Singh 等 (2020) 在研究中给出了对于这两类模型的物理解释, 认为这两者表示了雷达后向散射截面内, 沿 LOS 方向多个相互之间距离 d 小于雷达距离向分辨率 ΔR 的散射体产生的复合散射。尽管实验表明复合偶极子目标具有上述散射特性, 但在实际场景中不一定存在对应的理想目标。因此, 本文更倾向于将螺旋散射与复合偶极子散射视为雷达信号去极化程度的“指示器”。

除了上述两种散射模型外, PT5SD 还包含表面散射 $\mathbf{T}_s$ 、二面角散射 $\mathbf{T}_d$ 和植被体散射 $\mathbf{T}_v$ 模型, 其与 Yamaguchi 四分量分解 Y4O (Yamaguchi Four-component Original) (Yamaguchi 等, 2011) 中的模型相同, 其中植被体散射矩阵依据不同的冠层偶极子取向角概率密度函数, 分为标准、余弦和正弦 3 种模型。此外, 在二面角散射机制占主导的区域, 使用了一种表示完全去极化的随机散射状态的体散射模型 (An 等, 2011), 具体展开如下:

$$\mathbf{T}_v = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

综上, PT5SD 将相干矩阵扩展为 5 个子矩阵, 分别对应于表面散射、二面角散射、体散射、螺旋散射和复合偶极子散射机制:

$$\mathbf{T} = P_s \mathbf{T}_s + P_d \mathbf{T}_d + P_v \mathbf{T}_v + P_h \mathbf{T}_h + P_{\text{cd}} \mathbf{T}_{\text{cd}} \quad (32)$$

式中, $\mathbf{T}$ 是 SAR 数据的平均相干矩阵, P_s 、 P_d 、 P_v 、 P_h 、 P_{cd} 是待确定的散射功率, $\mathbf{T}_s$ 、 $\mathbf{T}_d$ 、 $\mathbf{T}_v$ 、 $\mathbf{T}_h$ 、 $\mathbf{T}_{\text{cd}}$ 是通过表面散射、二面角散射、体散射、螺旋散射、复合偶极子散射获得的散射子矩阵。

2.3.2 PT5SD 的解

在分解相干矩阵前, 需要使用 $\mathbf{U}_\theta$ 和 $\mathbf{U}_\varphi$ 两个西矩阵对 $\mathbf{T}$ 进行功率迁移, 西变换后得到的相干矩阵为 $\mathbf{T}'$ 。螺旋和复合偶极子散射功率可以直接由相干矩阵元素导出。由于体散射拥有不同分布, 还需要考虑不同情况下的解, 当体散射为均匀分布的植被时, 其解如下:

$$\begin{cases} T'_{11} = \frac{P_s}{1 + |\beta|^2} + \frac{P_d|\alpha|^2}{1 + |\alpha|^2} + \frac{P_v}{2} + \frac{P_{cd}}{2} \\ T'_{22} = \frac{P_s|\beta|^2}{1 + |\beta|^2} + \frac{P_d}{1 + |\alpha|^2} + \frac{P_v}{4} + \frac{P_h}{2} \\ T'_{12} = \frac{P_s\beta^*}{1 + |\beta|^2} + \frac{P_d\alpha}{1 + |\alpha|^2} \\ T'_{13} = \frac{P_{cd}}{2} \\ T'_{23} = \frac{P_h}{2} \\ T'_{33} = \frac{P_v}{4} + \frac{P_h}{2} + \frac{P_{cd}}{2} \end{cases} \quad (33)$$

$$\begin{cases} P_h = 2|\operatorname{Im}\{T'_{23}\}| \\ P_{cd} = 2|\operatorname{Im}\{T'_{13}\}| \end{cases} \quad (34)$$

$$\begin{cases} \frac{P_s}{1 + |\beta|^2} + \frac{P_d|\alpha|^2}{1 + |\alpha|^2} = S \\ \frac{P_s|\beta|^2}{1 + |\beta|^2} + \frac{P_d}{1 + |\alpha|^2} = D \\ \frac{P_s\beta^*}{1 + |\beta|^2} + \frac{P_d\alpha}{1 + |\alpha|^2} = C \end{cases} \quad (35)$$

式中,

$$\begin{cases} P_v = 2(2T'_{33} - P_h - P_{cd}) \\ S = T'_{11} - \frac{P_v}{2} - \frac{P_{cd}}{2} \\ D = T'_{22} - \frac{P_v}{4} - \frac{P_h}{2} \\ C = T'_{12} \end{cases} \quad (36)$$

在体散射为标准、余弦、正弦植被分布和去极化式 (31) 分布时, 模型分别有解如下:

$$\begin{cases} P_v = \frac{15}{8}(2T'_{33} - P_h - P_{cd}) \\ S = T'_{11} - \frac{P_v}{2} - \frac{P_{cd}}{2} \\ D = T'_{22} - \frac{7P_v}{30} - \frac{P_h}{2} \\ C = T'_{12} + \frac{P_v}{6} \end{cases} \quad (37)$$

$$\begin{cases} P_v = \frac{15}{8}(2T'_{33} - P_h - P_{cd}) \\ S = T'_{11} - \frac{P_v}{2} - \frac{P_{cd}}{2} \\ D = T'_{22} - \frac{7P_v}{30} - \frac{P_h}{2} \\ C = T'_{12} - \frac{P_v}{6} \end{cases} \quad (38)$$

$$\begin{cases} P_v = \frac{3}{2}(2T'_{33} - P_h - P_{cd}) \\ S = T'_{11} - \frac{P_v}{3} - \frac{P_{cd}}{2} \\ D = T'_{22} - \frac{P_v}{3} - \frac{P_h}{2} \\ C = T'_{12} \end{cases} \quad (39)$$

2.3.3 分支条件

开始进行分解时, 需要通过判断主导散射机制来确定体散射矩阵的类型。这一过程在 Y40 中是通过判断 $\operatorname{Re}\langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle$ 的符号实现的 (Yamaguchi 等, 2005), 其与协方差矩阵的 C_{13} 元素展开式有着直接的关联, 当体散射为完全去极化形式时, 体散射协方差矩阵的 C_{13} 元素为 0。基于此, 将 $\operatorname{Re}\langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle$ 展开为

$$\operatorname{Re}\langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle = \operatorname{Re}\{f_s\beta + f_d\alpha^*\} - \frac{1}{4}P_h + \frac{1}{4}P_{cd} \quad (40)$$

上式可转换为分支条件 C_1 (Sato 等, 2012):

$$C_1 = 2\operatorname{Re}\{f_s\beta + f_d\alpha^*\} = 2\operatorname{Re}\langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle + \frac{1}{2}P_h - \frac{1}{2}P_{cd} \quad (41)$$

$$C_1 = 2\operatorname{Re}\{f_s\beta + f_d\alpha^*\} = T_{11} - T_{22} + \frac{1}{2}P_h - \frac{1}{2}P_{cd} \quad (42)$$

通过判断分支条件 C_1 的正负, 便能判断出该区域的主导散射机制: 即 C_1 为负, 则认为二面角散射主导, 使用完全去极化的体散射矩阵; 反之当表面散射主导, 则使用植被体散射矩阵。当使用植被体散射矩阵时, 还需要再导出新的分支条件用于分解流程:

$$\operatorname{Re}\langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle = \operatorname{Re}\{f_s\beta + f_d\alpha^*\} + \frac{1}{8}P_v - \frac{1}{4}P_h + \frac{1}{4}P_{cd} \quad (43)$$

得到新的分支条件 C_0 :

$$C_0 = 2\operatorname{Re}\{f_s\beta + f_d\alpha^*\} = 2\operatorname{Re}\langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle - \frac{1}{4}P_v + \frac{1}{2}P_h - \frac{1}{2}P_{cd} \quad (44)$$

$$C_0 = 2\operatorname{Re}\{f_s\beta + f_d\alpha^*\} = T_{11} - T_{22} - T_{33} + P_h \quad (45)$$

同理, 通过判断分支条件 C_0 的正负, 便能判断出该区域的主导散射机制, 从而继续分解流程。基于功率迁移的五分量分解方法求解的整个流程详见图 3。

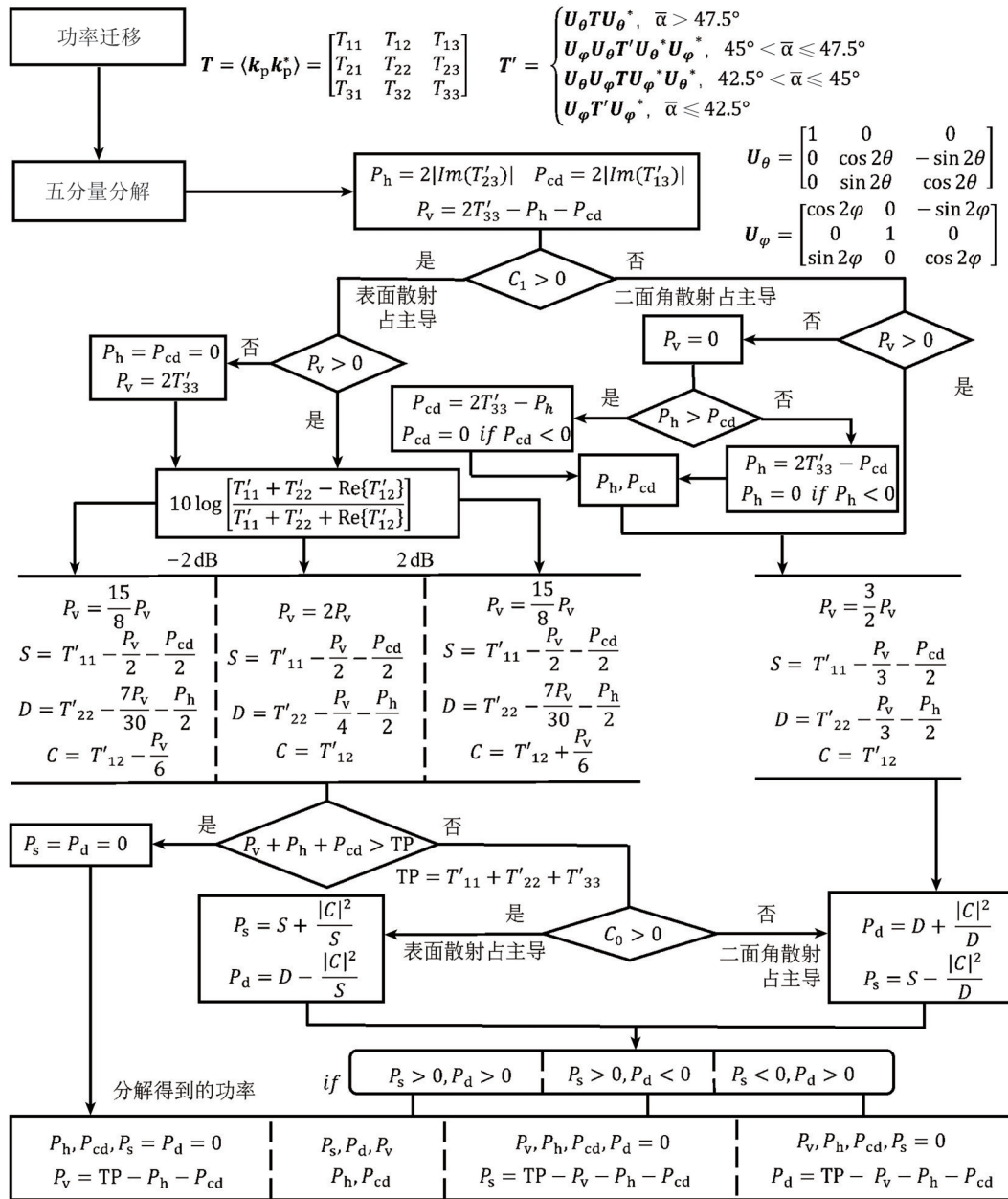


图3 基于功率迁移的五分量分解方法求解流程图(图中 T 、 T' 分别表示功率迁移前后的相干矩阵; $\mathbf{U}_\theta$ 、 $\mathbf{U}_\varphi$ 表示两个旋转矩阵; P_s 、 P_d 、 P_v 、 P_h 和 P_{cd} 分别对应表面散射、二面角散射、体散射、螺旋散射和复合偶极子散射功率;TP表示总功率)

Fig. 3 The workflow chart of power-transfer-based five-component scattering power decomposition (PT5SD)

(In the figure, T and T' represent the coherency matrices before and after power redistribution, respectively; $\mathbf{U}_\theta$ and $\mathbf{U}_\varphi$ denote the two rotation matrices; P_s , P_d , P_v , P_h and P_{cd} correspond to the powers of surface scattering, double-bounce scattering, volume scattering, helix scattering and compound dipole scattering, respectively; and TP indicates the total power)

3 结果与分析

本文将提出的 PT5SD 方法与现有的 FDD、Y40、7SD (Seven component Scattering Decomposition) (Singh 等, 2019) 等方法进行比较。首先使用 2015 年 7 月 6 日在美国加利福尼亚州旧金山采集的 ALOS-2 全极化数据进行实验, 多视窗口大小在距

离向被设置为 2, 方位向为 3。为了消除斑点噪声, 还对影像进行了 Boxcar 滤波, 窗口大小为 3。

图 4 为各类方法在 ALOS-2 数据上分解结果的 RGB 合成影像, 为了更好地比较各散射功率分解方法的结果, 在实验区中选取了 6 个典型场景, 分别为正交城区、轻度旋转城区、高度旋转城区、森林、岬角和水体。

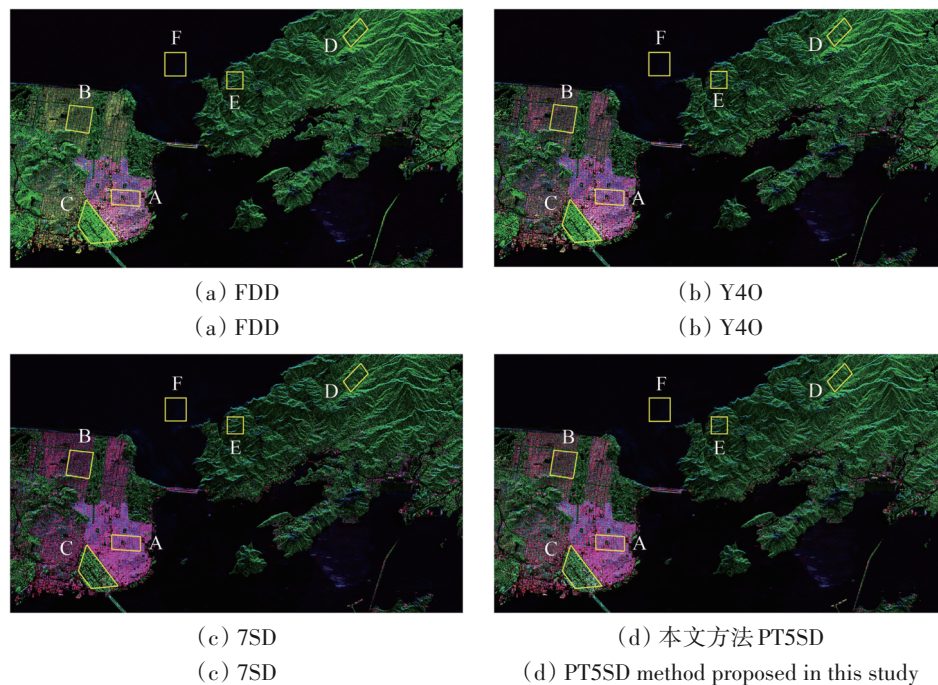


图4 不同基于散射模型的极化分解方法在旧金山实验区 ALOS-2 全极化数据上分解结果的 RGB 合成影像(红色,二面角散射;绿色,体散射;蓝色,表面散射。图中区域 A—F 分别代表正交城区、轻度旋转城区、高度旋转城区、森林、岬角和水体共 6 个旧金山实验区典型场景)

Fig. 4 RGB composite images of decomposition results obtained by applying different model-based polarimetric decomposition methods to the ALOS-2 full-polarimetric data over the San Francisco test site (Red, dihedral scattering; Green, volume scattering; Blue, surface scattering. Areas A to F in the image represent six typical scenes in the San Francisco test site: orthogonal urban area, slightly rotated urban area, highly rotated urban area, forest, headland, and water body, respectively)

为了更加直观地展示各场景散射特性差异,图 5 给出了上述 6 个场景的放大图。在正交城区,4 种方法均表现出以 P_d 为主导的特征,影像呈明显的红色,符合场景特征。

在轻度旋转城区, Y40、7SD 和 PT5SD 仍能准确识别主导散射机制,保持以红色为主的二面角散射特征, F3D 方法则在该区域出现明显的 P_v 高估现象。

随着城区沿 LOS 方向旋转角度的增加,高度旋转城区中的去极化效应显著增强,导致体散射分量上升。此时,各方法的分解结果影像均呈现明显的绿色,其中: F3D 和 Y40 的绿色更为明亮,说明其 P_v 估计偏高;相比之下, 7SD 与 PT5SD 有效抑制了过高的体散射估计,绿色色调较为暗淡,结果更加平衡。

在森林区域, 4 类极化分解方法均表现出以 P_v 为主导的特征,影像以绿色为主。这与植被冠层中普遍存在的偶极子散射机制及其引发的显著去极化效应在物理机制上高度吻合。与城区场景类似, 7SD 与 PT5SD 的影像绿色略暗,说明两者在功

率分配上更为平衡,具有更好的鲁棒性。

岬角区域的主体是玄武岩,地表植被覆盖稀疏且以低矮灌木为主,大面积基岩裸露。在该区域,四种方法的结果总体相近,仅在岩石裸露的山脊处出现细微差异,其中: 7SD 与 PT5SD 的蓝色更为明显,符合该区域以表面散射为主的特征。

在水体区域,各方法结果几乎一致,均呈现纯蓝色,表明表面散射占绝对主导。

为了进一步定量分析这些场景内的分解结果,图 6 中呈现了不同分解方法在不同场景下的平均散射功率统计图。可见在正交城区, 4 类方法在正交城区分解得到的 P_d 都在 61% 以上, 7SD 与 PT5SD 得到的最高,分别为 63.6% 与 62.3%;这一场景中 P_s 占比均在 33% 以上, PT5SD 方法在表面散射识别上表现最佳 (34.6%)。

在轻度旋转城区, Y40、7SD 和 PT5SD 这 3 类有效方法的散射功率分布呈现规律性变化: 3 类方法的结果中 P_d 均占 52.1% 以上,而 P_s 均在 28.9% 以上,并且各方法中的 P_v 、 P_h 、 P_{cd} 等功率均相较

于正交城区有所增加。以上结果印证了城区散射的两个本质特征：(1) 散射机制以二面角散射和

表面散射为主导；(2) 去极化程度与城区沿 LOS 方向的旋转程度呈正相关关系。

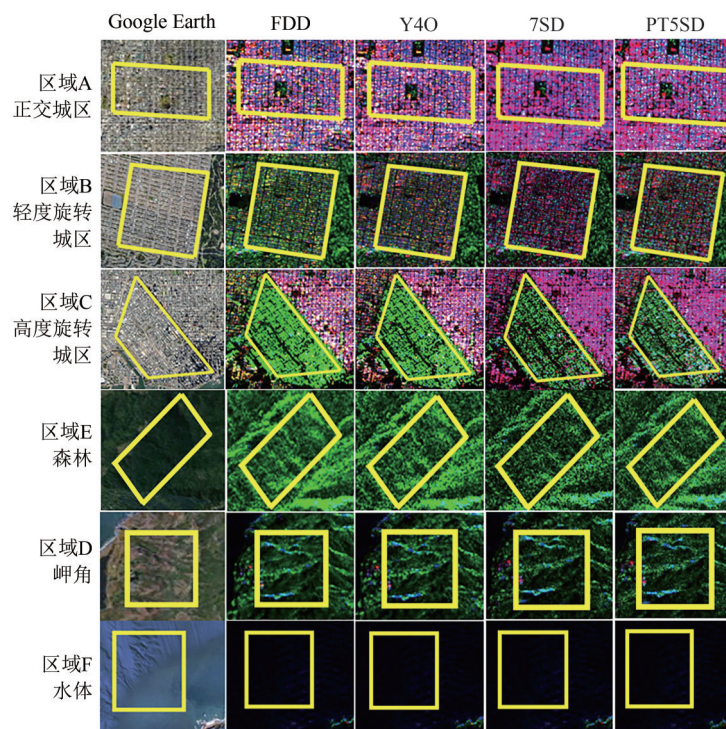


图5 旧金山实验区中6个典型场景经过不同基于散射模型的极化分解方法分解后的结果放大图
(红色, 二面角散射; 绿色, 体散射; 蓝色, 表面散射)

Fig. 5 Enlarged views of six typical scenes in the San Francisco test site, showing the decomposition results obtained by different model-based polarimetric decomposition methods (Red, dihedral scattering; Green, volume scattering; Blue, surface scattering)

在高度旋转城区, FDD 与 Y4O 均将旋转城区的主导散射机制误判为体散射, P_v 占比分别为 78.5% 与 59.7%。这表明虽然 Y4O 通过 POAC 部分消除了去极化效应, 但其补偿并不充分。实际上, Y4O 得到的 P_s 与 P_d 占比与 FDD 类似, 去极化功率更多是被螺旋散射机制吸收。作为目前较为先进的分解方法, 7SD 结果中 P_v 显著降低, 且 P_s 、 P_d 、 P_v 的占比较为接近, 并将剩余的功率分配给其余 4 个去极化的散射机制。然而, 7SD 方法中提出的几类散射模型 (Singh 等, 2020) 在实际复杂场景中的适用性仍有待进一步评估。因此, 本文将螺旋散射与复合偶极子散射视为雷达信号去极化程度的一种表征, 而非直接对应具体的物理目标。事实上, 对比区域 A、B、C 的分解结果可以发现, 随着城区沿 LOS 方向的旋转角度增加, 去极化程度增加, P_h 、 P_{cd} 的占比亦逐步增加。值得注意的是, PT5SD 方法在高度旋转城区得到了高达 32.6% 的 P_d , 相较其余几类方法提升明显, 同时实现了 44.9% 的 P_s 占比。这与前面总结的城区特征相吻合。然而与区域 A、B 不同的是, 在高度旋转城区

出现了 P_s 大于 P_d 的情况。对此, 一种合理的解释是: Chen 等 (2024) 基于电磁计算分析了标准二面角的散射特性: 在 HH 极化通道的散射场中, 当 POA 较小时, P_d 远高于 P_s 。但当 POA 较大时, P_d 能量下降, P_s 则逐渐增加成为重要的散射成分。总之, PT5SD 能够很好地恢复城区目标集合的反射对称性, 减少雷达信号的去极化程度, 增加作为城区普遍性特征的 P_s 与 P_d , 并用 P_h 、 P_{cd} 表征去极化程度。

在森林区, 值得注意的是场景中的 P_s 与 P_d : PT5SD 得到的 P_s 与 P_d 均为最大: 分别为 29.1% 和 21.4%。这是因为功率迁移变换消除了由于地形起伏与冠层表面散射所导致去极化功率, 使 P_s 得到了增加。此外, PT5SD 结果中的 P_d 相较于 7SD 要大 8.2%, 这部分能量主要是由恢复正交状态的山丘的二面角结构与恢复垂直于水平面的树木与地平面所形成的树干—地面二面角结构联合贡献。尽管 PT5SD 得到的 P_d 相较于其他 3 类方法最大, 但其仍小于 P_v , 符合这类以树木为主的植被区域的散射特点。

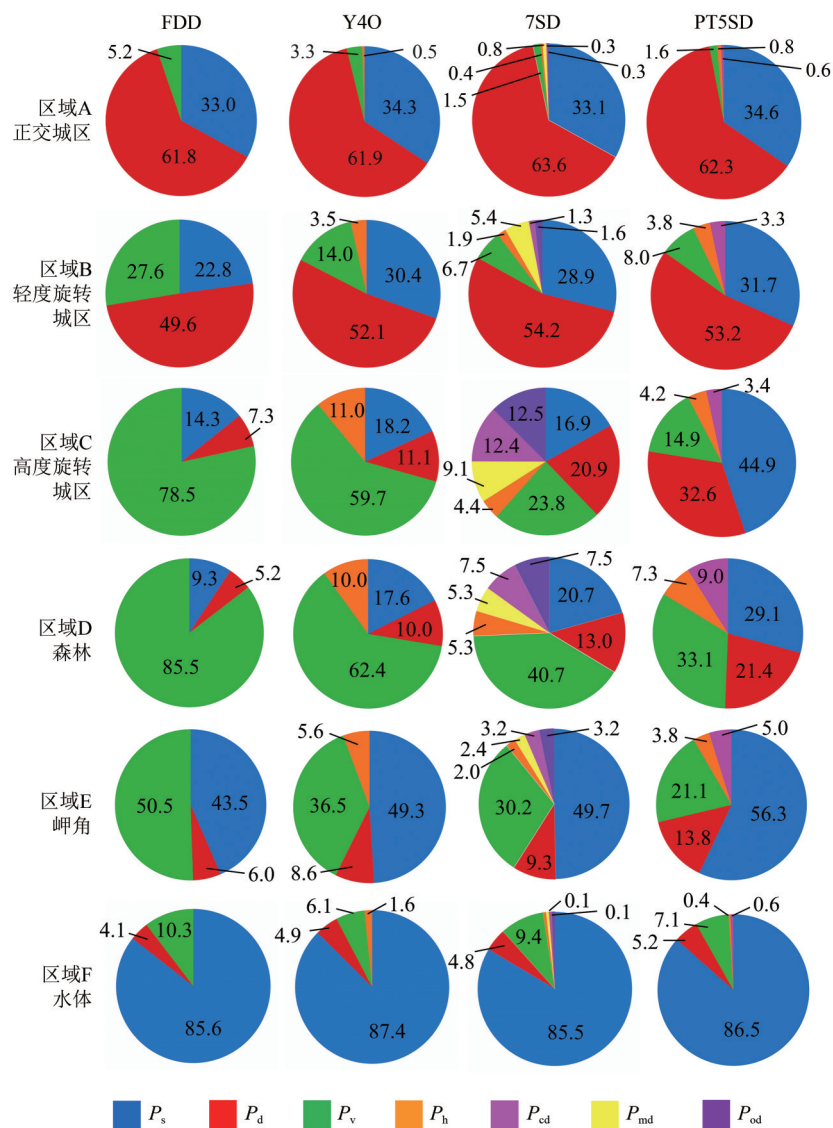


图6 旧金山实验区中6类典型场景的平均功率统计图(图中对<0.1%的组分不做标识, P_{md} 和 P_{od} 分别对应混合偶极子散射、方位偶极子散射功率)

Fig. 6 Average power statistics plot for six typical scenes in the San Francisco test site (Components comprising less than 0.1% are not labeled in the figure. P_{md} and P_{od} correspond to the powers of mixed dipole scattering and orientation dipole scattering, respectively)

岬角区域除FDD外,其余3类分解方法在该场景的结果均呈现明显的 P_s 主导特征,并且由于该区域植被较为稀疏,因此 P_v 低于森林区域,这一结果与区域地貌特征高度吻合。值得注意的是,陡峭地形所引发的表面倾斜效应导致了严重去极化现象,因此FDD分解结果出现了严重的体散射高估。Y4O通过POAC部分修正了去极化功率,但补偿并不充分。相比之下,PT5SD通过功率迁移有效降低表面散射去极化影响,得到了最低的 P_v 与最高的 P_s ,准确反映该区域散射特性。此外,PT5SD结果中的 P_d 相较于其他方法也是最高,为13.8%,这部分的能量应该主要来源于恢复正交状态的陡峭岩石的二面角结构。比较PT5SD在森林

区域与岬角区域的 P_h 、 P_{cd} 的占比,森林区域明显高于岬角区域,该差异源于植被冠层对雷达波的强去极化效应,与理论预测一致。

4种分解方法在水体区域的结果较为一致,均为表面散射占绝对性主导的情形,其中PT5SD的 P_s 为86.5%,略低于Y4O的87.4%。PT5SD的 P_d 略高于其他方法, P_v 是第二小的,但总的来说,几类方法的分解结果相近。

为了进一步验证本文提出的极化分解方法的有效性,使用德国Oberpfaffenhofen地区的E-SAR全极化数据进行实验。由于在先前的实验中,FDD的分解结果欠佳,图7中只给出剩余3种方法分解结果的RGB合成影像。沿用先前的区域分析

策略,在该实验区内标注了3类典型场景(G、H、I)进行对比分析。各场景特征如下:G场景呈现明显的二分结构,上部为森林覆盖区,下部为建

筑群;H场景包含多个旋转建筑物目标,其几何结构可有效验证方法对人工目标的方位敏感性;I场景是一个自然混合场景,包含树林与低矮植被区。

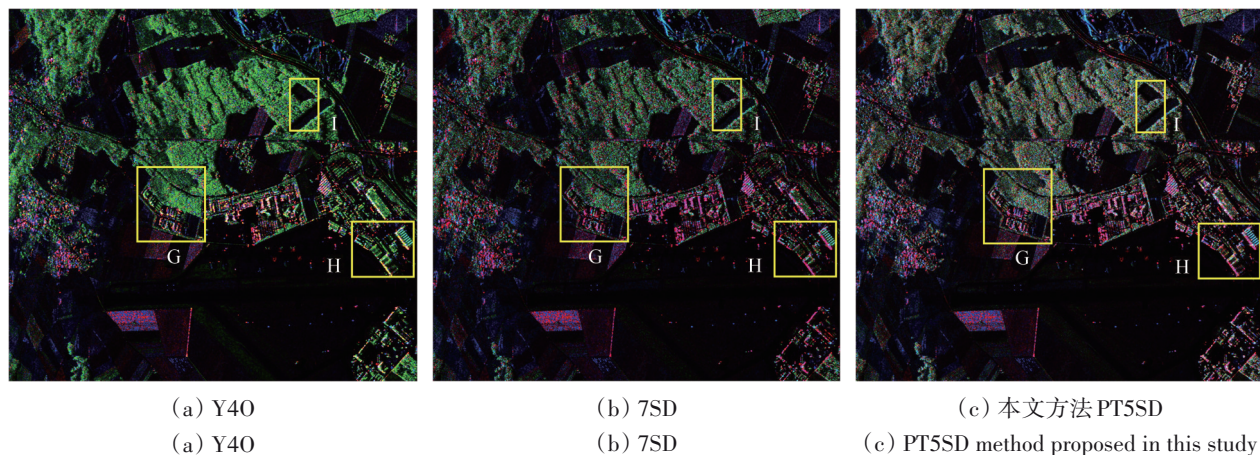


图7 不同基于散射模型的极化分解方法在Oberpfaffenhofen实验区E-SAR全极化数据上分解结果的RGB合成影像(图中场景G—I分别代表3个Oberpfaffenhofen实验区典型场景)

Fig. 7 RGB composite images of decomposition results obtained by applying different model-based polarimetric decomposition methods to the E-SAR full-polarimetric data over the Oberpfaffenhofen test site (Regions G—I represent three typical scenes within the Oberpfaffenhofen test site. Same below)

图8给出了这些场景的RGB合成影像。可以看到:Y40方法在G场景和H场景的旋转建筑物区域均呈现显著的绿色,表明该方法存在明显的体散射高估现象。在场景G中,PT5SD方法与7SD方法在建筑区域都表现出更准确的红色基调,这说明两种方法都很好地区分出该场景作为主导的二面角散射机制。

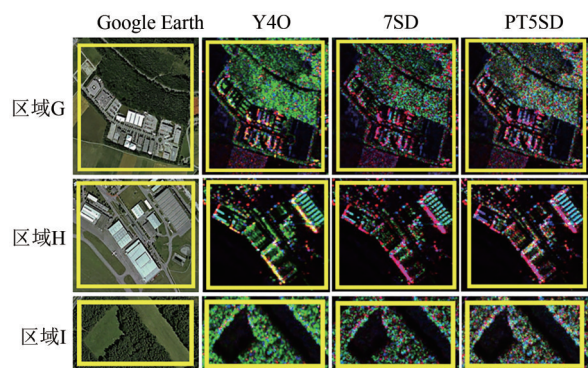


图8 Oberpfaffenhofen实验区中3个典型场景(G、H、I)经过不同基于散射模型的极化分解方法分解后的结果放大图

Fig. 8 Enlarged views of three typical scenes in the Oberpfaffenhofen test site, showing the decomposition results obtained by different model-based polarimetric decomposition methods

为了进一步分析,图9中给出了不同场景内的平均散射功率分布统计。在场景G中,尽管

PT5SD、7SD方法在建筑区域都表现出更准确的红色基调,但值得注意的是:7SD表现为明显红色的原因是大幅降低了 P_v ,而其余的散射机制功率与Y40接近。相比之下,PT5SD方法展现出更优的功率迁移特性:PT5SD在降低了 P_v 的同时,将迁移功率合理分配至表面散射与二面角散射。在统计特性上,这种功率重分配表现为 P_v 占比的显著降低(较Y40方法减少23.3%)与 P_s 、 P_d 的同步增强(分别增加6.6%和13.0%),其中二面角散射分量占比高达43.6%,这源于PT5SD成功恢复了地物的反射对称性,准确反映了建筑与树干—地面结构的复合贡献。此外,在场景H中,Y40分解得到的 P_s 占比高达30.3%,这说明POAC不能很好地恢复地物的反射对称性,尤其是这类旋转建筑物目标。相反,基于功率迁移的PT5SD方法在两个场景中都得到了较高的 P_s 与 P_d 。

为了更深入地剖析不同场景的散射机制分解效果,在建筑物场景H和自然场景I中分别选取了一条白色样本线,并在图10和图11中分别展示了各分解方法沿样本线得到的主要散射机制功率变化情况。图10中,样本线穿越了场景H的多个建筑物。对比各方法的功率曲线可以发现:沿样本线由左至右,3种方法均将影像最左侧的建筑物的左缘识别为二面角散射,这与雷达自左向右观测

时，建筑物左立面与地面形成典型二面角结构的物理特征相一致。然而，在随后的建筑主体区域，Y40 与 7SD 方法均出现了误判，将建筑物主体错误地识别为大量体散射，仅有 PT5SD 方法能够准确识别出建筑物的表面散射机制。类似的问题也出现在影像最右侧的建筑物处：尽管 3 种方法均能正确判断其左缘为二面角散射，但只有 PT5SD 能进一步准确识别其整体的表面散射机制。这一结果也印证了前文 PT5SD 在高度旋转城区的分解结果：该区域表现出明显的 P_s 增强。

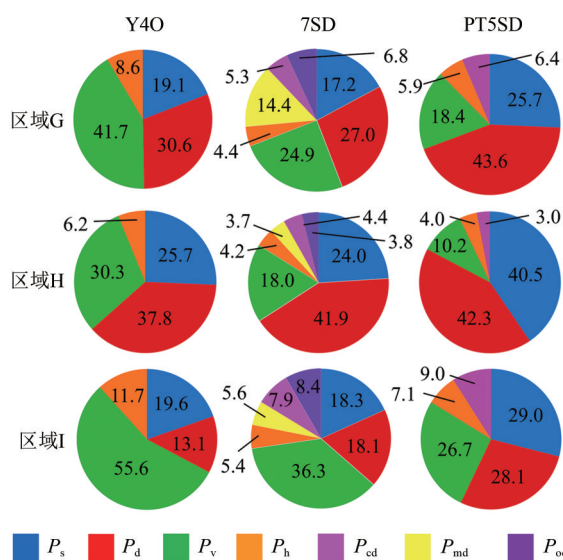
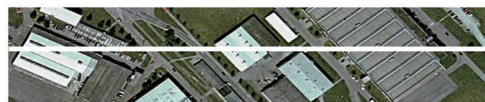


图9 Oberpfaffenhofen 实验区中 3 个典型场景的平均功率统计图(图中对<0.1%的组分不做标识, P_{md} 和 P_{od} 分别对应混合偶极子散射、方位偶极子散射功率)

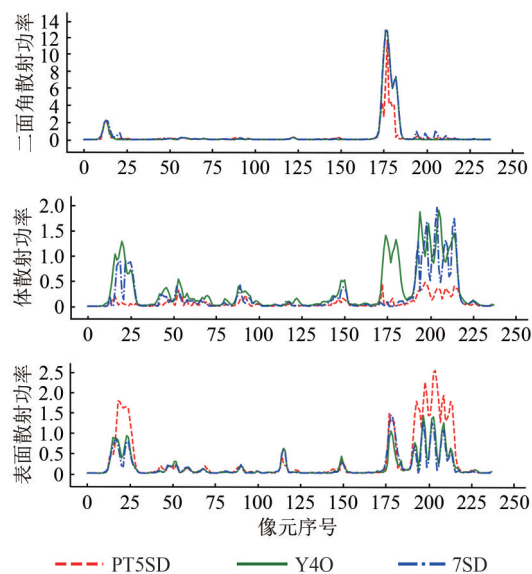
Fig. 9 Average power statistics plot for three typical scenes in the Oberpfaffenhofen test site (Components comprising less than 0.1% are not labeled in the figure. P_{md} and P_{od} correspond to the powers of mixed dipole scattering and orientation dipole scattering, respectively)

前文分析过，在场景 G 与 I 的自然区域分解结果中 PT5SD 的 RGB 影像呈现出明显偏弱的绿色调，相较于 Y40 和 7SD 方法更低。结合图 11 可以进一步解释这一现象：在树林区域，PT5SD 方法所分解得到的 P_v 略低于另外两种方法。尽管如此，沿样本线 PT5SD 所呈现出的 P_v 曲线与 Y40 和 7SD 基本一致，表明其仍能准确刻画地物的体散射特征。在 P_v 略有降低的同时，PT5SD 方法对 P_s 与 P_d 的分配有所增加，尤其在影像右侧的林区较为明显。考虑到雷达的观测方向（图 11 中自下而上，为便于观察影像已经过旋转），以及 L 波段较强的穿透能力，可以合理推断，林地边缘出现的这类散射增强现象

源于树干与地面之间形成的近似二面角结构。



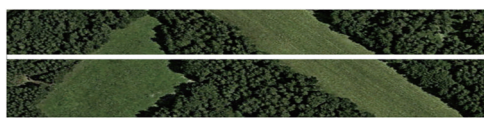
(a) 场景 H 的 Google Earth 光学影像与白色样本线
(a) Optical image of scene H from Google Earth with the white sample line



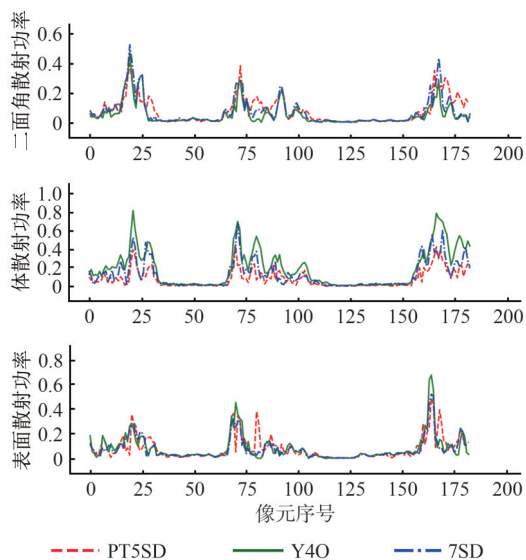
(b) 沿白色样本线的散射功率分解结果曲线
(b) Scattering power decomposition profiles along the white sample line

图 10 场景 H 中沿白色样本线的散射功率分解结果
Fig. 10 The decomposed scattering power results along the white sample line in scene H

最后需要对 PT5SD 方法的计算效率进行说明：基于式 (13) 的功率迁移顺序判断准则，本方法 (PT5SD) 与其余对照方法的核心区别在于需要预先计算两个关键参数：平均 α 角与 POA（后续计算流程与其他方法一致）。为量化该步骤的计算开销，我们在个人计算机（Intel Core i5-9300H@2.4 GHz, 16 GB RAM）上完成实验，采用 Python 实现并集成 Numba JIT 编译优化与多线程并行计算技术。结果表明：旧金山与 Oberpfaffenhofen 实验区的前序计算耗时分别为 29.4 s 和 18.3 s，说明了本方法的实用性。需要指出的是，在这一计算过程中，平均 α 角与 POA 的值可能受到极端场景下噪声或目标结构复杂性的影响，导致分解结果的轻微波动。尽管本文实验已表明 PT5SD 方法具备较好的稳定性，后续工作还将针对不同的信噪比条件，开展系统性的实验分析，以更全面地评估该方法的鲁棒性。



(a) 场景 I 的 Google Earth 光学影像与白色样本线
(a) Optical image of scene I from Google Earth with the white sample line



(b) 沿白色样本线的散射功率分解结果曲线
(b) Scattering power decomposition profiles along the white sample line

图 11 场景 I 中沿白色样本线的散射功率分解结果
Fig. 11 The decomposed scattering power results along the white sample line in scene I

4 结 论

为提升复杂场景下极化 SAR 目标散射机制的识别能力, 基于功率迁移, 采用 5 类地物散射模型, 提出了一种新型五分量极化分解方法 (PT5SD), 并与 FDD、Y4O、7SD 方法进行实验对比。主要结论如下:

- (1) PT5SD 通过功率迁移降低去极化影响, 能够有效恢复目标集合的反射对称性;
- (2) 该方法对场景内各类地物的散射功率分配合理, 能够突出建筑、植被等主要地物的散射特征, 避免体散射过高估计问题;
- (3) 方法计算开销低, 具有良好的实用性, 但在部分复杂场景中仍可能受到输入噪声和参数估计精度的影响。

综上, PT5SD 为极化 SAR 数据提供了一种新的物理分解手段, 有助于深入理解目标的极化特性, 为进一步的研究提供信息支撑。未来可结合时序和多源 SAR 数据, 进一步提升方法在复杂场

景下的适用性, 并拓展其在变化监测、地物分类等方面的应用潜力。

参考文献 (References)

- An W T and Lin M S. 2019. A reflection symmetry approximation of multilook polarimetric SAR data and its application to Freeman-Durden decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(6): 3649-3660 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2886386]
- An W T and Lin M S. 2020. An incoherent decomposition algorithm based on polarimetric symmetry for multilook polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(4): 2383-2397 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2948683]
- An W T, Xie C H, Yuan X Z, Cui Y and Yang J. 2011. Four-component decomposition of polarimetric SAR images with deorientation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(6): 1090-1094 [DOI: 10.1109/LGRS.2011.2157078]
- Chen S W, Ohki M, Shimada M and Sato M. 2013. Deorientation effect investigation for model-based decomposition over oriented built-up areas. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(2): 273-277 [DOI: 10.1109/LGRS.2012.2203577]
- Chen Y F, Zhang L M, Mallorqui J J and Zou B. 2024. Modified oriented dihedral model for scattering characteristic description with PolSAR data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17: 4829-4844 [DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3355985]
- Cloude S R and Pottier E. 1996. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(2): 498-518 [DOI: 10.1109/36.485127]
- Cui Y, Yamaguchi Y, Yang J, Kobayashi H, Park S E and Singh G. 2014. On complete model-based decomposition of polarimetric SAR coherency matrix data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(4): 1991-2001 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2257603]
- Freeman A and Durden S L. 1998. A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3): 963-973 [DOI: 10.1109/36.673687]
- Han W T, Fu H Q, Zhu J J, Wang C C and Xie Q H. 2022. Polarimetric SAR decomposition by incorporating a rotated dihedral scattering model. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19: 4005505 [DOI: 10.1109/LGRS.2020.3035567]
- Huynen J R. 1978. *Phenomenological theory of radar targets/Electromagnetic Scattering*. New York: Academic Press: 653-712
- Kimura H. 2008. Radar polarization orientation shifts in built-up areas. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(2): 217-221 [DOI: 10.1109/LGRS.2008.915737]
- Lee J S and Ainsworth T L. 2011. The effect of orientation angle compensation on coherency matrix and polarimetric target decompositions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1): 53-64 [DOI: 10.1109/tgrs.2010.2048333]
- Lee J S and Pottier E. 2009. *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*. New York: CRC Press: 89-385
- Lee J S, Schuler D L and Ainsworth T L. 2000. Polarimetric SAR data compensation for terrain azimuth slope variation. *IEEE Transac-*

- tions on Geoscience and Remote Sensing, 38(5): 2153-2163 [DOI: 10.1109/36.868874]
- Sato A, Yamaguchi Y, Singh G and Park S E. 2012. Four-component scattering power decomposition with extended volume scattering model. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 9(2): 166-170 [DOI: 10.1109/LGRS.2011.2162935]
- Singh G, Malik R, Mohanty S, Rathore V S, Yamada K, Umemura M and Yamaguchi Y. 2019. Seven-component scattering power decomposition of POLSAR coherency matrix. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 57(11): 8371-8382 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2920762]
- Singh G, Mohanty S, Yamazaki Y and Yamaguchi Y. 2020. Physical scattering interpretation of POLSAR coherency matrix by using compound scattering phenomenon. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 58(4): 2541-2556 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2952240]
- Singh G and Yamaguchi Y. 2018. Model-based six-component scattering matrix power decomposition. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 56(10): 5687-5704 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2824322]
- Xiang D L, Ban Y F and Su Y. 2015. Model-based decomposition with cross scattering for polarimetric SAR urban areas. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 12(12): 2496-2500 [DOI: 10.1109/LGRS.2015.2487450]
- Xie Q H, Zhu J J, Lopez-Sanchez J M, Wang C C and Fu H Q. 2018. A modified general polarimetric model-based decomposition method with the simplified neumann volume scattering model. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 15(8): 1229-1233 [DOI: 10.1109/LGRS.2018.2830503]
- Xu F and Jin Y Q. 2005. Deorientation theory of polarimetric scattering targets and application to terrain surface classification. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43(10): 2351-2364 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.855064]
- Yamaguchi Y, Moriyama T, Ishido M and Yamada H. 2005. Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43(8): 1699-1706 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.852084]
- Yamaguchi Y, Sato A, Boerner W M, Sato R and Yamada H. 2011. Four-component scattering power decomposition with rotation of coherency matrix. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49(6): 2251-2258 [DOI: 10.1109/tgrs.2010.2099124]
- Zou B, Zhang Y, Cao N and Minh N P. 2015. A four-component decomposition model for PolSAR data using asymmetric scattering component. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8(3): 1051-1061 [DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2380151]

Power-transfer-based five-component scattering decomposition for polarimetric SAR

LIU Yuxuan, FU Haiqiang, ZHU Jianjun

School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: Model-based polarimetric decomposition methods are widely used in polarimetric Synthetic Aperture Radar (SAR) data analysis because of their simplicity and clear physical interpretation. However, their performance is often compromised by depolarization effects in complex scattering environments. Polarimetric Orientation Angle Compensation (POAC) is employed to mitigate depolarization effects by restoring reflection symmetry and thus improving the general applicability and accuracy of decomposition results. However, POAC relies on geometrical correction, exhibits limited effectiveness in complex scenes, and lacks a comprehensive explanation for how scattering power is redistributed among different mechanisms. This work addresses these shortcomings by reinterpreting POAC through the concept of power transfer, on the basis of which a five-component decomposition framework is constructed.

This study reinterprets POAC as a power transfer process in which scattering power is redistributed among channels via unitary matrix rotation. A unitary transformation framework that restores the measured coherency matrix to an ideal reflection-symmetric form is established. Within this framework, we propose the power transfer five-component scattering decomposition (PT5SD) method, which (1) estimates two polarization orientation angles from the coherency matrix, (2) applies the corresponding unitary transformations to restore reflection symmetry, and (3) decomposes the corrected coherency matrix into five physically meaningful components: surface scattering, double-bounce scattering, volume scattering, helix scattering, and compound-dipole scattering.

Experiments are conducted using ALOS-2 and E-SAR fully polarimetric SAR data. Compared with several existing decomposition methods, the proposed PT5SD method effectively restores the reflection symmetry of target ensembles, achieves a reasonable redistribution of scattering power among different mechanisms within the scene, and highlights the dominant scattering characteristics of various land-cover types. These results indicate that PT5SD considerably suppresses depolarization effects and improves the interpretability of scattering mechanisms across complex scenes.

Key words: PolSAR, coherency matrix, polarimetric decomposition, polarimetric orientation angle, unitary transformation, power transfer, depolarization

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42227801, 42574048)