

# 基于极化特征参数和极化干涉最优参数的改进四元素分解方法

王宇\*<sup>①②</sup> 禹卫东<sup>①②</sup> 刘秀清<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 雷达目标的后向散射对目标姿态与雷达视线的相对几何关系十分敏感,同一目标相对于雷达视线的姿态不同时,散射特性十分不同。倾斜地表和倾斜建筑物等目标可能扭转后向散射回波的极化基,进而导致交叉极化分量过高,图像体散射成分过估计。该文针对图像体散射成分过估计的现象,提出一种基于极化特征参数( $H/\alpha$ )和极化干涉相似性参数(PISP)的极化干涉分解方法。该方法充分考虑了散射体在雷达视线方向上的散射多样性,对不同取向的倾斜地表和倾斜建筑物等目标产生的交叉极化分量进行更好的适配,得到更好的分解结果。最后,利用由中国科学院电子学研究所获取的机载C波段全极化干涉数据验证该方法在极化干涉分解中的有效性。实验结果表明,该改进算法可以有效、正确地区分地物散射特性。

**关键词:** 极化干涉合成孔径雷达;  $H/\alpha$ 分解; 极化干涉相似性参数; 四元素分解; 极化干涉最优相干参数

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)12-2881-08

DOI: 10.11999/JEIT190108

# An Improved Four-component Decomposition Method Based on the Characteristic of Polarization and the Optimal Parameters of PolInSAR

WANG Yu<sup>①②</sup> YU Weidong<sup>①②</sup> LIU Xiuqing<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The backscattering of the radar targets is sensitive to the relative geometry between orientations of the targets and the radar line of sight. When the orientations of the same target are different from the radar line of sight, the scattering characteristics are quite different. Targets such as inclined ground and inclined buildings may reverse the polarization base of the backscattered echo, which causes the cross-polarization component to be too high and the volume scattering component of the image is overestimated. In this paper, a polarimetric interferometric decomposition method based on polarimetric parameters ( $H/\alpha$ ) and Polarimetric Interferometric Similarity Parameters (PISP) is proposed to solve the overestimation problem. The method makes full use of the scattering diversity of the scatterer in the radar line of sight. The cross-polarization components generated by targets such as inclined grounds and inclined buildings with different orientations are better adapted to obtain better decomposition results. Finally, the effectiveness of the proposed method in polarimetric interferometric decomposition is verified by the airborne C-band PolInSAR data obtained by the Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences. The experimental results show that the proposed improved algorithm can distinguish the scattering characteristics of terrain types effectively and correctly.

**Key words:** Polarimetric SAR Interferometry (PolInSAR);  $H/\alpha$  decomposition; Polarimetric Interferometric Similarity Parameter (PISP); Four-component decomposition; Optimal coherent parameters of polarization interference

## 1 引言

对极化合成孔径雷达(PolSAR)获得的图像进行极化分解处理是处理全极化图像的最基本的方

法。目标分解的主要目的是将极化散射矩阵或者是相干矩阵/协方差矩阵分解成代表不同散射机制的若干项的和,每一项都对应着特殊的物理意义,可以用于目标检测或目标分类。 $H/\alpha$ 分解方法<sup>[1,2]</sup>是通过目标的熵和散射角的不同取值对整体的散射机理进行细致的表述。Yamaguchi分解<sup>[3]</sup>是在Freeman

收稿日期: 2019-02-25; 改回日期: 2019-04-23; 网络出版: 2019-04-29

\*通信作者: 王宇 wangyu370705@163.com

提出的三元素分解<sup>[4]</sup>的基础上增加了螺旋散射分量后的分解形式,与Freeman分解结果相比,在图像分解方面更有优势。近几年来,通过对Yamaguchi分解方法和Freeman分解方法进行改进<sup>[5-8]</sup>,图像分解结果与实际地物散射机制更为一致。

由Cloude和Papathanassiou<sup>[9]</sup>提出的极化干涉合成孔径雷达(PolInSAR)的基本理论有效地整合了极化和干涉信息,得到的数据既具有干涉SAR对散射体运动和变化信息敏感的优势,又具有极化SAR对散射体结构、方向以及纹理等特性敏感的特点。利用极化干涉数据计算得到的极化干涉最优相干参数可以用于表征地物散射相干性信息<sup>[10]</sup>,这些参数包含了丰富的极化、干涉和极化干涉信息,可以对极化散射特性较为相似的地物进行有效地区分。

虽然 $H/\alpha$ 分解方法和Yamaguchi分解方法可以较为准确地区分不同地物散射类型,但是,对于与飞行方向倾角较大的建筑物地区仍然无法得到准确的分解结果<sup>[11]</sup>。本文所提算法将上述两种方法有效地结合起来,先使用 $H/\alpha$ 分解方法,利用极化散射参数对图像目标进行区域划分,得到能较为准确地反映地物散射机理的初步划分结果,再结合Yamaguchi分解方法,对正确划分区域内的目标散射机理进行分解。通过加入由最优散射机制计算得到的极化干涉相似性参数(Polarimetric Interferometric Similarity Parameters, PISP),可以改善经 $H/\alpha$ 分解和Yamaguchi分解得到的初始分解结果的体散射模型。利用PISP对相似地物的区分能力,倾斜的建筑物、阶梯式的梯田、分层的山脉和植被可以被区分开,有效地解决在极化分解中具有二面角散射特性的地物的误分解问题。与Yamaguchi分解方法、扩展的四元素分解方法和改进的四元素分解方法得到的结果相比,本文分解结果在梯田和分层的山脉等表现为二面角散射的区域结果更为准确,具有很好的鲁棒性。

## 2 极化特征参数与极化干涉最优参数

### 2.1 极化相干矩阵与旋转

极化雷达测量媒质的散射矩阵为 $\mathbf{S} = [S_{HH} \ S_{HV}; S_{VH} \ S_{VV}]$ ,对于互易的后向散射媒质( $S_{HV} = S_{VH}$ ),相干矩阵 $\mathbf{T}_3$ 可以写成

$$\mathbf{T}_3 = \langle \mathbf{k} \cdot \mathbf{k}^H \rangle = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{k} = (1/\sqrt{2}) [S_{HH} + S_{VV}, S_{HH} - S_{VV}, 2S_{HV}]^T$  是Pauli散射矢量,  $\mathbf{k}^H$  是 $\mathbf{k}$ 的共轭转置。 $T_{ij}$ 是 $\mathbf{T}_3$ 的第 $(i, j)$ 个输入。 $S_{HV}$ 是垂直发射、水平接收的后向散射回波。

为了在旋转域中更好地划分目标散射机制,相干矩阵被扩展到沿雷达视线方向的旋转域<sup>[6,10,12,13]</sup>,

$$\mathbf{T}_3(\theta) = \mathbf{R}_3(\theta) \mathbf{T}_3 \mathbf{R}_3^T(\theta), \theta \in [-\pi, \pi] \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{R}_3(\theta)$ 是旋转矩阵,表达式与文献<sup>[10]</sup>相同。

### 2.2 极化特征参数

基于特征值-特征向量的极化分解方法的相干矩阵可以写成

$$\mathbf{T} = \mathbf{U} \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \mathbf{U}^H, \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \quad (3)$$

在本文所提方法中,用到的极化特征参数主要是指极化散射熵 $H$ 和平均散射角 $\bar{\alpha}$ 。散射熵 $H$ 和平均散射角 $\bar{\alpha}$ 的表达式为<sup>[1]</sup>

$$H = \sum_{i=1}^3 -P_i \log_3 P_i, \bar{\alpha} = \sum_{i=1}^3 P_i \alpha_i \quad (4)$$

其中,  $P_i = \lambda_i / \sum_{j=1}^3 \lambda_j$ ,  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 是特征值,  $\mathbf{U}$ 为分解的特征向量。

### 2.3 极化干涉基本原理与极化干涉最优相干系数

极化干涉系统的极化干涉相关信息可以用一个 $6 \times 6$ 的Hermite半正定矩阵 $\langle T_6 \rangle$ <sup>[14]</sup>表示

$$\langle T_6 \rangle = \left\langle \begin{bmatrix} \mathbf{k}_1 \\ \mathbf{k}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{k}_1^H & \mathbf{k}_2^H \end{bmatrix} \right\rangle = \begin{bmatrix} \langle T_{11} \rangle & \langle W_{12} \rangle \\ \langle W_{21} \rangle & \langle T_{22} \rangle \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,上标“H”代表共轭转置,  $\mathbf{k}_1$ 和 $\mathbf{k}_2$ 分别代表两幅全极化图像的散射矢量,主、副图像的全极化信息分别包含在Hermite矩阵 $\langle T_{11} \rangle$ 和 $\langle T_{22} \rangle$ 中,  $\langle W_{12} \rangle$ 是非Hermite矩阵,包含极化信息和干涉信息。

干涉相干系数和相位信息对极化状态有很强的依赖性,引入与极化散射体制相对应的单位投影矢量 $\mathbf{w}_1$ 和 $\mathbf{w}_2$ ,将Pauli基散射矢量 $\mathbf{k}_1$ 和 $\mathbf{k}_2$ 分别投影到 $\mathbf{w}_1$ 和 $\mathbf{w}_2$ 上,可以得到相关系数的表达形式。对于分布式目标,利用极化干涉最优散射机制定义的目标相似性参数PISP的表达式定义为<sup>[8,10]</sup>

$$\text{PISP} = \frac{|\text{Tr}(\mathbf{w}_1^H W_{12} \mathbf{w}_2)|^2}{\text{Tr}(\mathbf{w}_1^H T_{11} \mathbf{w}_1) \text{Tr}(\mathbf{w}_2^H T_{22} \mathbf{w}_2)} \quad (6)$$

其中,  $|\cdot|$ 代表取绝对值运算,  $\text{Tr}(\cdot)$ 代表矩阵的秩,  $[\mathbf{w}_1] = [\mathbf{w}_{1,\text{opt}1}, \mathbf{w}_{1,\text{opt}2}, \mathbf{w}_{1,\text{opt}3}]$ 和 $[\mathbf{w}_2] = [\mathbf{w}_{2,\text{opt}1}, \mathbf{w}_{2,\text{opt}2}, \mathbf{w}_{2,\text{opt}3}]$ 分别为主、副图像的最优散射矢量组成的最优散射矩阵。特征向量 $\mathbf{w}_{1,\text{opt}j}$ 和 $\mathbf{w}_{2,\text{opt}j}$ 相互正交且散射机理之间统计独立。

由式(6)可以看出, PISP与散射矩阵的绝对幅度信息和目标取向角无关,可以用于表征地物目标的极化干涉稳定性信息,是分析目标性能的有效参数。可以利用PISP对现有的散射模型进行改进,使分解方法自适应地满足不同的地物散射类型。

### 3 基于极化特征参数和极化干涉最优参数的改进四元素分解方法

#### 3.1 已有的改进的极化分解算法

本节旨在对文献[15]中提出的一种改进的极化四元素分解方法进行简单的介绍。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{T}_s(\theta) &= f_s \begin{bmatrix} 1 & \beta^* \cos(2\theta) & -\beta^* \sin(2\theta) \\ \beta \cos(2\theta) & |\beta|^2 \cos^2(2\theta) & -|\beta|^2 \sin(2\theta) \cos(2\theta) \\ -\beta \sin(2\theta) & -|\beta|^2 \sin(2\theta) \cos(2\theta) & |\beta|^2 \sin^2(2\theta) \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}_d(\theta) &= f_d \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & \alpha \cos(2\theta) & -\alpha \sin(2\theta) \\ \alpha^* \cos(2\theta) & \cos^2(2\theta) & -\sin(2\theta) \cos(2\theta) \\ -\alpha^* \sin(2\theta) & -\sin(2\theta) \cos(2\theta) & \sin^2(2\theta) \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

非反射对称条件下的体散射回波特征可以用一般体散射模型表示<sup>[16,18]</sup>，该模型由随机参数 $n$ 和平均倾角 $\theta$ 两个参数构成，其表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_\alpha &= \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0.25 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_\beta = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0 & -\cos(2\theta) & \sin(2\theta) \\ -\cos(2\theta) & 0 & 0 \\ \sin(2\theta) & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{T}_\gamma(4\theta) &= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(4\theta) & -\sin(4\theta) \\ 0 & -\sin(4\theta) & -\cos(4\theta) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

对于具有确定主导散射类型的像素点，主导散射机理用一般散射模型形式表示，非主导散射机理用简化散射模型表示，矩阵可以分解为分量矩阵加

为使得表面散射和偶次散射模型的矩阵表征形式更具有一般性和普适性，不同于文献[16]给出的传统模式下的表面散射和偶次散射表征形式，将表面散射模型和二面角散射模型扩展到非反射对称的条件下<sup>[17]</sup>

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_v(\theta) &= \mathbf{T}_\alpha + 2n/(n+1) \mathbf{T}_\beta(2\theta) \\ &+ \mathbf{T}_\gamma(4\theta) n(n-1)/[(n+1)(n+2)] \end{aligned} \quad (8)$$

其中，

和的形式。当表面散射、偶次散射和体散射分别为主导散射类型时，极化相干矩阵的分解形式分别表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= \mathbf{T}_s(\theta) + \mathbf{T}_v + \mathbf{T}_d \\ &= f_s \begin{bmatrix} 1 & \beta^* \cos(2\theta) & -\beta^* \sin(2\theta) \\ \beta \cos(2\theta) & |\beta|^2 \cos^2(2\theta) & -|\beta|^2 \sin(2\theta) \cos(2\theta) \\ -\beta \sin(2\theta) & -|\beta|^2 \sin(2\theta) \cos(2\theta) & |\beta|^2 \sin^2(2\theta) \end{bmatrix} + f_v \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0.25 \end{bmatrix} + f_d \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= \mathbf{T}_d(\theta) + \mathbf{T}_v + \mathbf{T}_s \\ &= f_d \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & \alpha \cos(2\theta) & -\alpha \sin(2\theta) \\ \alpha^* \cos(2\theta) & \cos^2(2\theta) & -\sin(2\theta) \cos(2\theta) \\ -\alpha^* \sin(2\theta) & -\sin(2\theta) \cos(2\theta) & \sin^2(2\theta) \end{bmatrix} + f_v \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0.25 \end{bmatrix} + f_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= \mathbf{T}_v(\theta) + \mathbf{T}_s + \mathbf{T}_d \\ &= f_v \left( \mathbf{T}_\alpha + \frac{2n}{n+1} \mathbf{T}_\beta(2\theta) + \frac{n(n-1)}{(n+1)(n+2)} \mathbf{T}_\gamma(4\theta) \right) + f_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + f_d \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

在进行分解处理时，首先需要计算主导散射成分的平均取向角和扩展系数；然后，在总功率中减去主导散射机制的功率，并从剩余的功率中计算非主导散射成分的功率值。由于这种改进的分解方法不再优先提取体散射成分，而是将主导散射机理的特征参数进行了优先提取，可以有效地解决传统四分量分解方法中体散射成分过估计的问题。根据文献[15]分析得到的结果可知：位于 $H/\alpha$ 平面中的低

散射熵偶次散射区、低散射熵表面散射区和高散射熵植被散射区的回波像素点的主导散射特征分别为表面散射、二面角散射和体散射。具体的参数计算公式在文献[15]中由表格的形式给出。

#### 3.2 本文所提改进的四元素分解算法

本文所提方法是基于文献[19]的方法的延拓，在进行理论论证的同时，将该方法应用到PolInSAR数据中。在文献[20,21]中已经表明PISP作为PolInSAR

的2阶统计参数,可以对地物散射特性进行有效的描述,且地物目标稳定性越高,PISP的值越大。改进体散射模型为

$$\mathbf{T}_{v\_new}(\theta) = \mathbf{R}_r \cdot \mathbf{T}_v(\theta) \quad (11)$$

其中,  $\mathbf{R}_r = [1 \ 1 \ pp]$ 且  $pp = PISP / (1 - PISP)$ 。由于  $d_{pp} / d_{PISP} = 1 / (1 - PISP)^2 > 0$ ,所以  $pp$ 是  $PISP$ 的

递增函数,可以随体散射功率的变化而自适应地变化。当  $pp \leq 1$ 时,原有的体散射模型不变;当  $pp > 1$ 时,使用改进的体散射模型对原有的矩阵进行改进。

利用特征参数  $(H, \alpha)$ 、极化干涉相似性参数(PISP)和一般的散射机理模型的极化干涉分解算法的流程图如图1所示,具体的流程描述如下:

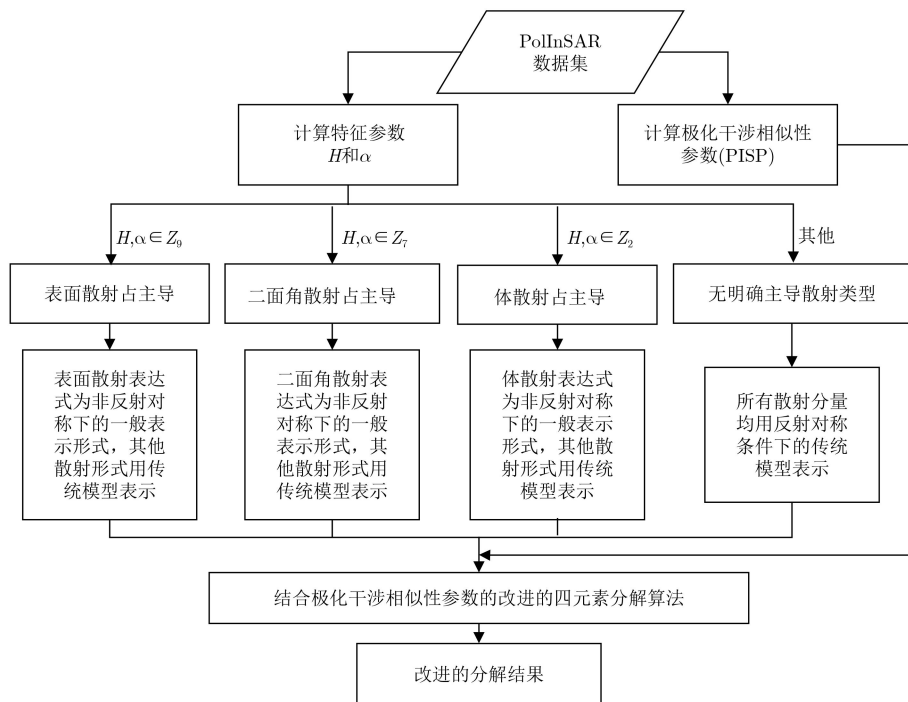


图1 本文所提算法流程框图

(1) 根据PolInSAR实验数据,去取向计算得到散射特征参数  $H, \alpha$ 和极化干涉相似性参数(PISP),根据特征参数的取值将整个区域划分为9部分,根据各个区域的具体含义,对目标的主导散射机制进行初步的判别,将位于  $H/\alpha$ 平面中的低散射熵偶次散射区、低散射熵表面散射区和高散射熵植被散射区的像素点的主导散射特征分别划分为表面散射、二面角散射和体散射。

(2) 对存在明确主导散射类型的像素点,主导散射类型的相干矩阵用一般形式表示,非主导散射类型的矩阵用传统的形式表示;对于没有明确的主导散射类型或主导散射类型不确定的像素点,所有的散射类型均用传统模型表示。

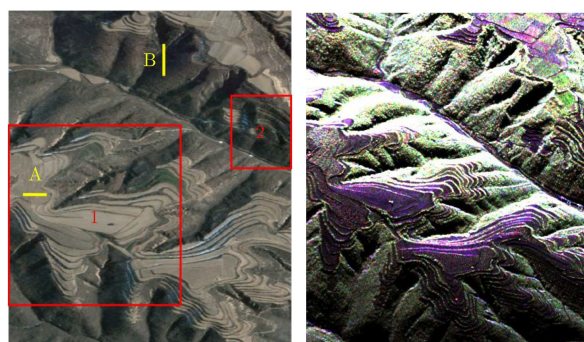
(3) 在完成上述步骤后,得到了已完成初步判别的相干矩阵。将得到的相干矩阵结合PISP进行改进的四元素分解处理,得到分解结果。

## 4 实验结果

本文采用中国科学院电子学研究所获取的机载C波段极化干涉数据来验证所提改进的分解方法的有效性。图2(a)为Google earth得到的实验观测场

景的光学图像,包含的主要地物为森林、梯田、分层的山脉、裸土、农田等。图2(b)为该区域全极化SAR图像的Pauli基伪彩色合成图,图2(b)中一些植被和梯田、有层次的山脉的极化特性相似。

利用多种分解方法对试验数据进行分解,不同分解方法对同一图像进行分解处理的分解结果在图3中给出。为了验证所提算法的正确性,将本文提出的分解算法得到的分解结果与传统的去取向Yamaguchi四分量分解算法、扩展四元素分解算法<sup>[9]</sup>、



(a) 观测场景的光学图像

(b) Pauli伪彩图

图2 观察场景的光学图及伪彩图

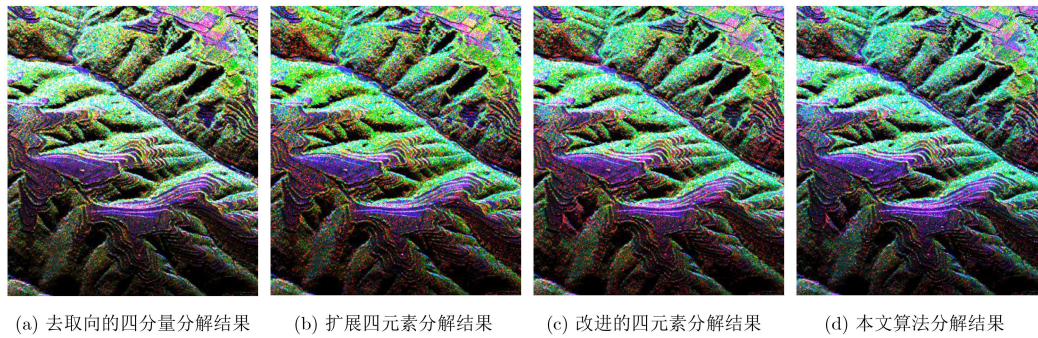


图3 不同分解算法得到的分解结果伪彩图

Latrache等人结合极化干涉相似性参数提出的改进的四元素分解算法<sup>[21]</sup>得到的分解结果进行比较, 定性、定量地对得到的结果进行全局化、区域化的分析。

图3(a)和图3(b)分别表示去取向的Yamaguchi四分量分解方法和扩展四元素分解算法分解方法得到的伪彩色合成图, 图3(c)和图3(d)分别表示改进的四元素分解算法和本文算法的分解结果的伪彩图。分解结果分别用3种散射机制功率 $P_v$ (体散射成分)、 $P_s$ (表面散射成分)和 $P_a$ (二面角散射成分和螺旋散射成分)的彩色合成图表征, 其中蓝色表示 $P_s$ , 红色表示 $P_a$ , 绿色表示 $P_v$ 。

由上述结果可知, 图3(a)中图像部分地区的体散射成分存在过估计情况; 图3(b)所示的方法是在原有的四元素分解的基础上进行了改进, 体散射过估计的情况有所改善, 但在改善体散射成分过估计这一问题的同时, 使得部分地区存在人造地物散射过估计的问题; 图3(c)所示的方法通过结合极化干涉相似性参数, 可以将体散射与人造地物散射类型进行合理的区分, 一定程度上克服了图3(b)所示方法出现的问题; 图3(d)是使用本文算法得到的结果, 图3(d)中呈现二面角散射特性的农作物与地面构成的二面角被正确识别并标识为粉红色, 梯田和有层次的山脉被标为蓝色偏红, 地物类型可以被正确的识别。这说明本文算法可以有效识别具有二面角散射特性的散射分量。此外, 图3(d)中森林地区呈现明显的绿色, 说明图中的体散射成分没有被过分抑制。由于本文算法有效地结合了极化数据和干涉数据的优势, 对地物目标结构具有很强的敏感性, 能够有效地解决极化方法中存在的误分解问题。

为了定量的分析这4种方法的有效性, 对4种分解方法得到的结果进行成分统计, 将得到的图像分解结果的散射成分统计如表1所示。

由表1的统计数据可知, 传统的四元素分解方法会导致整体的体散射成分偏高, 二面角散射成分偏低。在实验场景中, 虽然体散射成分是主体散射成分, 但是散射成分 $P_d$ 仍然占有一定的比例, 远高

表1 散射功率量化统计

分解方法	$P_v$	$P_s$	$P_d$	$P_c$
传统的四元素分解算法	0.8664	0.0227	0.1038	0.0071
扩展的四元素分解算法	0.8338	0.0258	0.1309	0.0095
改进的四元素分解算法	0.7563	0.0267	0.2087	0.0083
本文方法	0.7304	0.0326	0.2283	0.0087

于传统的分解算法得到的结果。为了更好地分析这4种方法的优势与不足, 下面具体分析两块感兴趣的区域。

图4所选取的区域主要为农田、森林、梯田和分层的山脉区域, 该区域主要为体散射成分, 图像结果是在2017年11月份得到的, 农作物虽然已经部分收割完成, 但仍有大片的秸秆及未收割区域。由于农作物秸秆与地面形成的二面角、阶梯形式的梯田形成的二面角以及分层的山脉之间形成的二面角的存在, 散射成分 $P_d$ 比重相对较高。由表2可知, 传统的四元素分解方法得到的体散射成分比例明显偏高, 存在过估计的现象, 在切片图中, 农田作物区域呈现明显的绿色。扩展的四元素分解算法一定程度上解决了体散射过估计的问题, 但是在森林地区出现了红色区域, C波段的穿透性不足以达到穿透树冠到达地面进而检测到树干与地面形成的二面角散射的效果, 所以该方法存在二面角散射成分过估计的问题。与仅用极化数据进行分解的改进的四元素分解算法相比, 本文算法可以在更好地解决体散射成分过估计问题的同时, 一定程度上提高对二面角散射成分的判断的准确性, 在呈现表面散射特性的裸土区域也获得了更为准确的分解结果。

图5所选取的区域主要为森林、梯田和分层的山脉区域, 该区域主要地物为森林, 主要散射类型为体散射, 但由于梯田和分层的山脉的结构形式的特殊性, 存在一定比例的二面角散射成分。由表3可知, 传统的四元素分解方法对体散射成分存在过估计的现象, 体散射成分比例偏高, 在切片图中,

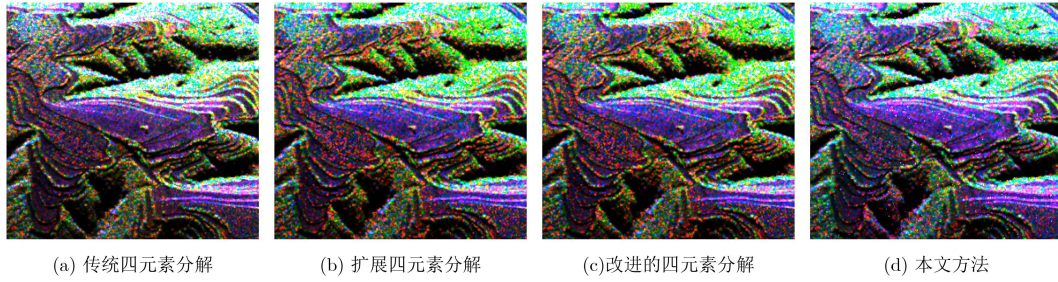


图4 典型区域1的4种算法分解结果细节切片图

表2 典型区域1散射功率量化统计

分解方法	$P_v$	$P_s$	$P_d$	$P_c$
传统的四元素分解算法	0.8664	0.0227	0.1028	0.0081
扩展的四元素分解算法	0.7338	0.0258	0.2289	0.0115
改进的四元素分解算法	0.7563	0.0267	0.2077	0.0093
本文方法	0.7304	0.0326	0.2264	0.0106

分层的山脉区域总体呈现绿色。随着算法的改进，体散射成分过估计的问题逐渐得到改善，本文提出的算法对于解决体散射成分过估计问题具有一定的优势，在还原二面角散射成分的同时，对场景中包含的表面散射成分进行了正确的识别，得到了更好的分解结果。

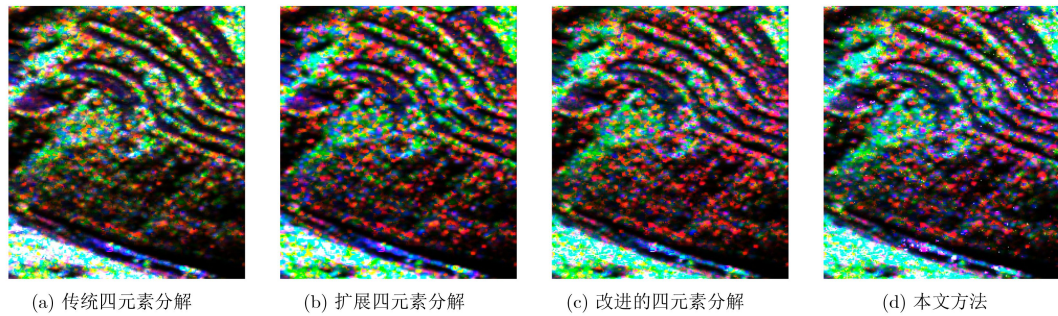


图5 典型区域2的4种算法分解结果细节切片图

表3 典型区域2散射功率量化统计

分解方法	$P_v$	$P_s$	$P_d$	$P_c$
传统的四元素分解算法	0.7737	0.0330	0.1847	0.0086
扩展的四元素分解算法	0.7909	0.0397	0.1615	0.0079
改进的四元素分解算法	0.7283	0.0508	0.2105	0.0104
本文方法	0.7148	0.0525	0.2216	0.0111

为了更明确地表述本文算法在图5切片中表述二面角(梯田和分层的山脉)区域的优势，将表现为

二面角散射特性的像素点分别用上述4种分解方法提取出来，得到二分提取结果(表现为二面角散射特性的像素点置为1，其余像素点置为0)，提取结果如图6所示。同时，将得到的二分结果与地面真实值进行比较，得到每种分解方法对于分解二面角散射区域的准确性，如表4所示。由表4可知，传统的四元素分解方法和改进的四元素分解算法得到的分解结果可以正确识别出一定比例的二面角散射区

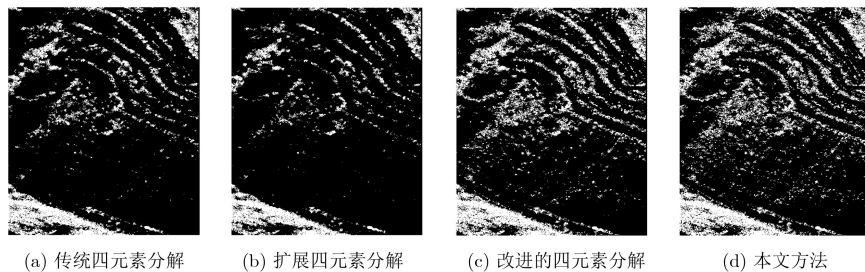


图6 典型区域2的4种算法二面角散射像素点提取结果

表4 典型区域2分解算法准确性统计结果

分解方法	传统的四元素分解算法	扩展的四元素分解算法	改进的四元素分解算法	本文方法	二面角散射像素点个数
提取得到的二面角散射像素点个数	47986	41571	52612	55462	63625
提取准确性(%)	75.42	66.91	82.69	87.17	

域, 而扩展的四元素分解算法在这一小块区域的有效性较低, 分解结果不能高效地识别二面角散射区域。相比较而言, 本文算法得到的分解结果在识别二面角散射区域具有一定的优势, 对不同地物散射类型进行更为准确的刻画。

为了定性的分析上述4种方法的优势与不足,

选取如图2(a)中所示的长度分别为80, 100像素的两条切线进行分析。切线A选取的区域尽量选在平坦的区域, 具有一定比例的表面散射成分; 切线B则选在森林非密集的区域, 主要表现为体散射成分, 树木之间的间隙则表现为二面角散射。得到的切线结果如图7所示。

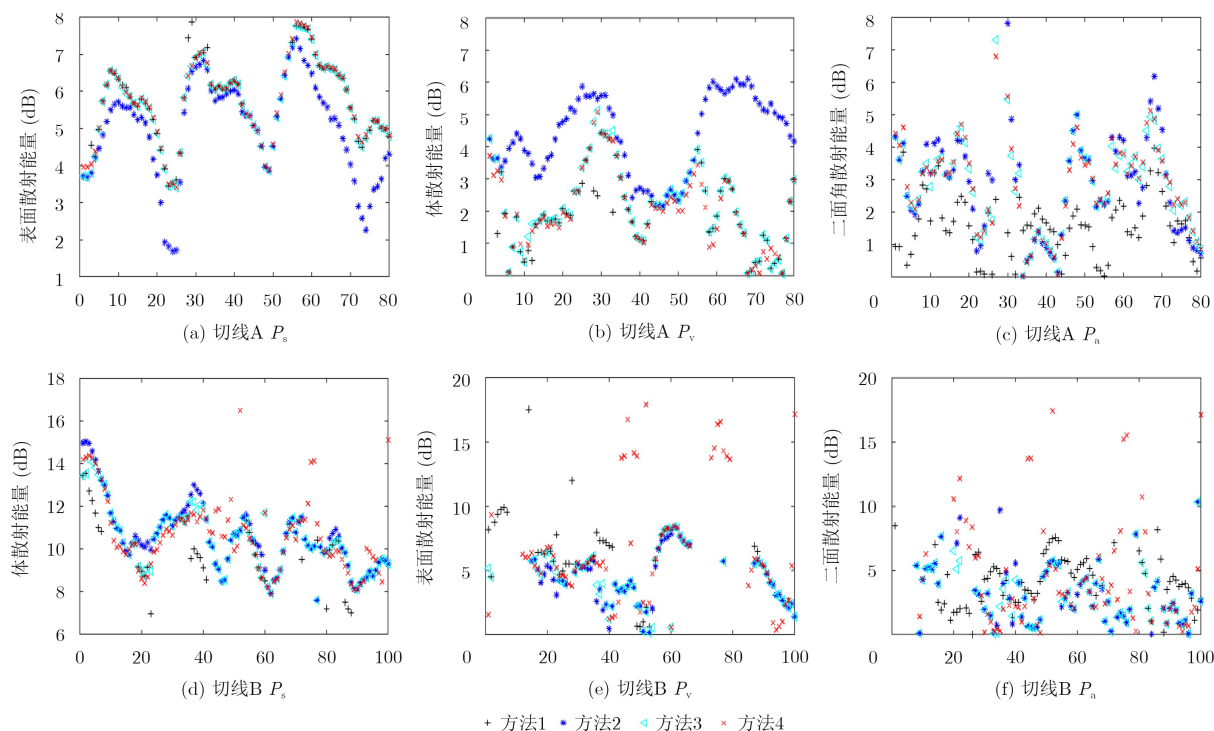


图7 切线散射成分统计结果

图7中, 方法1代表传统的四元素分解方法, 方法2代表扩展的四元素分解方法, 方法3代表改进的四元素分解方法, 方法4代表本文算法。

由统计结果可知, 在切线A处, 本文算法得到的表面散射成分可以保持良好的特性, 体散射成分与初始的传统四元素分解方法相比得到了很好的抑制, 二面角散射成分提取得到了良好的效果。对于切线B而言, 在表现为二面角散射特性的森林间隙, 本文算法可以将这一部分区域正确的分解出来, 而对于植被茂密的区域则表现为准确的体散射, 对于森林间隙较大的可以近似为裸土的区域, 则表现为表面散射, 与其他3种方法相比, 对地物散射类型分解具有一定的优势, 而且具有很好的鲁棒性。

## 5 结论

本文结合极化特征参数和散射机理, 将极化相似性参数定义的极化干涉相似性参数(PISP)作为辅助, 提出了一种新的分解方法, 使得得到的结果不但对有向性散射敏感, 而且具有旋转不变性。通过对主导散射机制进行优先判别、对不同地物使用自

适应性的植被模型, 可以更准确地表征地物目标散射特性, 更为有效地解决植被成分过高估计的问题。通过对比本文算法与已有的分解算法得到的实验结果, 可以看出本文算法简单有效, 可以正确地呈现二面角散射特性的区域和植被, 具有很好的鲁棒性。

## 参考文献

- [1] CLOUDE S R and POTTIER E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(1): 68–78. doi: [10.1109/36.551935](https://doi.org/10.1109/36.551935).
- [2] SALEHI M, MAGHSOUDI Y, and MOHAMMADZADEH A. Assessment of the potential of H/A/Alpha decomposition for polarimetric interferometric SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(4): 2440–2451. doi: [10.1109/TGRS.2017.2780195](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2780195).
- [3] YAMAGUCHI Y, MORIYAMA T, ISHIDO M, et al. Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(8): 1699–1706. doi: [10.1109/](https://doi.org/10.1109/)

- TGRS.2005.852084.
- [4] FREEMAN A and DURDEN S L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(3): 963–973. doi: [10.1109/36.673687](https://doi.org/10.1109/36.673687).
- [5] QUAN Sinong, XIANG Deliang, XIONG Boli, *et al.* A hierarchical extension of general four-component scattering power decomposition[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(8): 856. doi: [10.3390/rs9080856](https://doi.org/10.3390/rs9080856).
- [6] SUN Xiang, SONG Hongjun, WANG R, *et al.* High-resolution polarimetric SAR image decomposition of urban areas based on a POA correction method[J]. *Remote Sensing Letters*, 2018, 9(4): 363–372. doi: [10.1080/2150704X.2017.1418989](https://doi.org/10.1080/2150704X.2017.1418989).
- [7] KUMAR A, PANIGRAHI R K, and DAS A. Three-component decomposition technique for hybrid-pol SAR data[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(9): 1569–1574. doi: [10.1049/iet-rsn.2015.0298](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0298).
- [8] XIANG Deliang, WANG Wei, TANG Tao, *et al.* Multiple-component polarimetric decomposition with new volume scattering models for PolSAR urban areas[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(3): 410–419. doi: [10.1049/iet-rsn.2016.0105](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0105).
- [9] CLOUDE S R and PAPATHANASSIOU K P. Polarimetric SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(5): 1551–1565. doi: [10.1109/36.718859](https://doi.org/10.1109/36.718859).
- [10] CHEN Siwei, WANG Xuesong, LI Yongzhen, *et al.* Adaptive model-based polarimetric decomposition using PolInSAR coherence[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(3): 1705–1718. doi: [10.1109/TGRS.2013.2253780](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2253780).
- [11] CHEN Siwei, OHKI M, SHIMADA M, *et al.* Deorientation effect investigation for model-based decomposition over oriented built-up areas[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(2): 273–277. doi: [10.1109/LGRS.2012.2203577](https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2203577).
- [12] CHEN Siwei, WANG Xuesong, and SATO M. Uniform polarimetric matrix rotation theory and its applications[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(8): 4756–4770. doi: [10.1109/TGRS.2013.2284359](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2284359).
- [13] 陈思伟, 李永祯, 王雪松, 等. 极化SAR目标散射旋转域解译理论与应用[J]. *雷达学报*, 2017, 6(5): 442–455. doi: [10.12000/JR17033](https://doi.org/10.12000/JR17033).
- CHEN Siwei, LI Yongzhen, WANG Xuesong, *et al.* Polarimetric SAR target scattering interpretation in rotation domain: Theory and application[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(5): 442–455. doi: [10.12000/JR17033](https://doi.org/10.12000/JR17033).
- [14] MAURYA H and PANIGRAHI R K. Non-negative scattering power decomposition for PolSAR data interpretation[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(6): 593–602. doi: [10.1049/iet-rsn.2017.0581](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0581).
- [15] 王春乐, 李光廷, 禹卫东. 改进的极化SAR图像三分量分解方法[J]. *宇航学报*, 2013, 34(7): 980–986. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2013.06.013](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2013.06.013).
- WANG Chunle, LI Guangting, and YU Weidong. Improved three-component scattering power decomposition for polarimetric SAR image[J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(7): 980–986. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2013.06.013](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2013.06.013).
- [16] XIE Qinghua, ZHU Jianjun, LOPEZ-SANCHEZ J M, *et al.* A modified general polarimetric model-based decomposition method with the simplified Neumann volume scattering model[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(8): 1229–1233. doi: [10.1109/LGRS.2018.2830503](https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2830503).
- [17] CHEN Siwei, WANG Xuesong, XIAO Shunping, *et al.* General polarimetric model-based decomposition for coherency matrix[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(3): 1843–1855. doi: [10.1109/TGRS.2013.2255615](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2255615).
- [18] ARII M, VAN ZYL J J, and KIM Y. A general characterization for polarimetric scattering from vegetation canopies[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(9): 3349–3357. doi: [10.1109/tgrs.2010.2046331](https://doi.org/10.1109/tgrs.2010.2046331).
- [19] SATO A, YAMAGUCHI Y, SINGH G, *et al.* Four-component scattering power decomposition with extended volume scattering model[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(2): 166–170. doi: [10.1109/lgrs.2011.2162935](https://doi.org/10.1109/lgrs.2011.2162935).
- [20] 许丽颖, 李世强, 邓云凯, 等. 基于极化干涉相似性参数的四元素分解[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(4): 908–914. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01095](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01095).
- XU Liying, LI Shiqiang, DENG Yunkai, *et al.* Four-component decomposition based on polarimetric interferometric similarity parameter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(4): 908–914. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01095](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01095).
- [21] LATRACHE H, OUARZEDDINE M, and SOUISSI B. Improved model-based polarimetric decomposition using the POLINSAR similarity parameter[J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, XLI-B7: 847–850. doi: [10.5194/isprs-archives-XLI-B7-847-2016](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B7-847-2016).
- 王 宇: 女, 1993年生, 博士生, 研究方向为极化与极化干涉合成孔径雷达技术研究.
- 禹卫东: 男, 1969年生, 博士生导师, 研究方向为合成孔径雷达信号处理技术.
- 刘秀清: 女, 1974年生, 硕士生导师, 研究方向为极化与极化信息处理.