

引用格式: FU Longchong, ZHU Jianjun, FU Haiqiang, *et al.* Adaptive decomposition of long-wave PolInSAR targets for the bistatic SAR system[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(5): 1017-1027. [符龙崇, 朱建军, 付海强, 等. 面向双站 SAR 系统的长波 PolInSAR 目标自适应分解[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(5): 1017-1027.]

DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2023.5.1017

## 面向双站 SAR 系统的长波 PolInSAR 目标自适应分解

符龙崇<sup>1</sup>, 朱建军<sup>1</sup>, 付海强<sup>1</sup>, 解清华<sup>2</sup>, 韩文涛<sup>1</sup>

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083;

2. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 双站 SAR 系统无时间去相干的特性, 结合长波的强穿透能力, 在估计植被结构参数上应用前景极大, 借助极化干涉 SAR 分解技术研究双站 SAR 系统下的植被区散射过程, 对揭示信号与地物的交互过程, 构建植被结构参数反演模型具有重要意义。考虑模型适用性和双站 SAR 系统存在的不可忽略的去相干, 将极化干涉矩阵表达为极化方位角扩展的广义表面散射矩阵、广义二次散射矩阵和 Neumann 自适应体散射矩阵与其对应相干成分乘积的和的形式, 基于残差最小二乘准则, 使用非线性最小二乘优化技术同时求解所有模型参数。使用 BioSAR 2008 项目的 L 波段全极化机载数据对方法进行测试, 获取了实验区不同散射机制的相干成分、相位分布和能量信息, 结合机载激光雷达数据进行了分析。结果表明: 分解方法对植被区不同散射机制区分良好, 有效抑制了体散射功率高估; 植被区表面散射在垂直向上的分布与植被高度和穿透程度存在联系, 体散射相位中心高度与机载激光雷达植被高接近且趋势一致; 有效估计了散射机制的相干性。

**关键词:** 双站 SAR 极化干涉测量; 长波; 目标自适应分解; 植被区散射机制

**中图分类号:** TN911.7      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-0323(2023)05-1017-11

### 1 引言

陆地探测一号(LT-1)卫星系统的搭建与运行极大的填补了我国在星载多极化多模式等遥感领域的空白, LT-1 卫星系统由 A、B 两颗全极化 L 波段 SAR 卫星组成。双站 SAR 系统在单发双收观测模式(Bistatic)下获取的极化干涉 SAR(Polarimetric Synthetic Aperture Radar Interferometric, PolInSAR)数据具有零时间基线的独特优势<sup>[1]</sup>。在此基础上, 利用不同极化状态下的干涉信息, 进一步揭示植被区复杂散射过程, 对构建植被结构参数反演模型和获取高精度林下地形具有重要意义。

极化 SAR(Polarimetric SAR Interferometry,

PolSAR)技术获取的全极化信息对植被散射体的形态、朝向分布以及介电属性敏感, 因此 PolSAR 技术能够识别植被区的不同散射机制, 是解译植被区复杂散射过程的重要手段之一<sup>[2]</sup>。PolSAR 目标分解是识别和分离 SAR 数据分辨单元中不同散射贡献的有效方法。其中, 基于物理模型的 PolSAR 目标分解因其物理意义明确且表达和计算过程简单, 在解释植被散射特性方面受到了广泛关注<sup>[3-4]</sup>。Freeman-Durden 三分量分解<sup>[5]</sup>作为 PolSAR 目标分解的先驱方法之一, 其假设后向散射数据的相干矩阵可以表示为三种散射机制相干矩阵的线性和, 分别是表面散射、二次散射以及由完全随机的偶极子

收稿日期: 2022-07-07; 修订日期: 2023-08-31

**基金项目:** 国家自然科学基金项目“低矮植被覆盖下的双站极化干涉 SAR 高精度地形测绘研究”(41820104005), 国家自然科学基金项目“顾及森林随机体非随机朝向/非均匀分布的长波 PolInSAR 林下地形反演”(41904004), 国家自然科学基金项目“基于长波 SAR 数据的植被覆盖区时序极化 InSAR 地表形变监测理论与方法”(42030112), 国家自然科学基金项目“顾及植被形态结构异质性的极化干涉 SAR 林下地形反演研究”(41804004)。

**作者简介:** 符龙崇(1998—), 男, 湖南泸溪人, 硕士研究生, 主要从事 PolInSAR 植被区散射机理解译与参数反演研究。E-mail: flccsu@csu.edu.cn

**通讯作者:** 朱建军(1962—), 男, 湖南双峰人, 教授, 主要研究测量平差、PolInSAR 及地表覆盖层参数反演研究。E-mail: zjj@csu.edu.cn

产生的体散射。其中,体散射模型主要刻画植被区的冠层结构。然而,上述偶极子体散射模型仅对目标散射粒子远小于雷达波长的场景有效<sup>[6]</sup>,在大多自然林区并不适用。为了提高体散射模型对植被复杂多样冠层结构的适用性,Neumann使用粒子各向异性刻画粒子形态,采用圆高斯分布建模冠层随机散射过程,提出了Neumann体散射模型<sup>[7-8]</sup>。该模型可以描述从确定性分布到完全随机分布的冠层散射粒子,能适用于几乎所有的植被类型。同时,上述表面散射和二次散射模型无法模拟交叉极化通道信号,导致在存在地形坡度的植被区,解译的体散射贡献会高于真实值。鉴于此,Chen等<sup>[9]</sup>引入极化方位角(POA),提出了广义表面散射模型和广义二次散射模型,显著提升了分解性能和模型适用性。然而基于模型的PolSAR分解存在着无法明确散射机制垂直分布情况的局限性,例如无法区分开发发生在冠层和地表的表面散射功率贡献<sup>[10]</sup>。将PolSAR分解理论扩展到PolInSAR数据框架衍生出的PolInSAR目标分解,引入了干涉信息,为克服PolSAR目标分解的局限性提供了新思路。Ballester-Berman和Lopez-Sanchez将Freeman-Durden三分量分解理论应用到PolInSAR数据框架之中<sup>[10]</sup>,获取了3种典型散射机制的功率贡献之外,还给出了3种散射机制在垂直向上的高度分布。在此基础上,Guo等<sup>[11]</sup>针对体散射模型和参数解算提出了改进,一方面使用Yamaguchi正余弦体散射模型代替随机偶极子体散射模型,另一方面提出使用复相干集拟合地表相位给定二次散射相位中心初值,扩展了PolInSAR目标分解方法的适用性<sup>[12]</sup>。但上述PolInSAR目标分解方法均使用单一固定的体散射模型刻画植被冠层,不能推广到长波视野下的自然林区;同时没有利用完整的PolInSAR信息,无法考虑局部地形坡度变化对散射信号的影响,限制了方法的适用性。

在LT-1等新一代双站SAR系统背景下,PolInSAR目标分解方法一方面需要考虑二次散射存在的与高度相关的额外去相干,另一方面,面向大范围长波视野下的自然林区,需要使用更具通用性的体散射模型并考虑地形坡度变化对散射信号影响。因此,研究将散射机制的相干成分作为模型参数纳入分解框架,同时使用Neumann体散射模型自适应刻画复杂多样的冠层结构,将地形坡度变化引起的POA偏移引入表面散射和二次散射模型之中,

提出了双站PolInSAR目标自适应分解方法(BP-TAD),使用非线性最小二乘技术进行求解。最终获取了植被区3种典型散射机制的功率贡献、相干成分及其在垂直向上的分布情况。

## 2 极化SAR散射模型

### 2.1 顾及地形坡度影响的表面散射和二次散射模型

表面散射模型描述轻微粗糙表面的一阶Bragg散射,忽略交叉极化项<sup>[13]</sup>,则其对应的极化相干矩阵为<sup>[14-15]</sup>:

$$\mathbf{T}_s = f_s \begin{bmatrix} 1 & \beta^* & 0 \\ \beta & |\beta|^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:  $|\beta| < 1$ ,  $f_s$  对应于表面散射对  $|S_{HH} + S_{VV}|^2$  的贡献,上标  $(\cdot)^*$  表示共轭。二次散射模型描述植被区地表和树干构成的二面角结构的散射情况,忽略交叉极化项,其对应的极化相干矩阵为<sup>[14-15]</sup>:

$$\mathbf{T}_d = f_d \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & \alpha & 0 \\ \alpha^* & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中:  $|\alpha| < 1$ ,  $f_d$  对应于二次散射对  $|S_{HH} - S_{VV}|^2$  的贡献。长波SAR信号在植被区穿透效应明显,地表响应强烈,地形坡度变化对地表散射信号影响较大,需要建模进行考虑。地形坡度变化对SAR信号的影响主要有两方面,一是引起图像单位面积雷达截面的变化,二是方位向坡度引起的极化方向的变化,第一种可通过辐射斜率校正来补偿<sup>[16]</sup>。本文讨论第二种影响的补偿,当存在地形坡度时,SAR信号的人射面和反射面存在一个偏移角POA,假设地形坡度变化导致的POA偏移只旋转表面散射和二次散射<sup>[17]</sup>,则可以通过对表面散射矩阵和二次散射矩阵旋转方向角  $\theta_s$  和  $\theta_d$  来表示顾及地形坡度影响的表面和二次散射模型<sup>[9]</sup>。

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_s(\theta_s) &= \mathbf{R}(\theta_s) \mathbf{T}_s \mathbf{R}(\theta_s) \\ &= f_s \begin{bmatrix} 1 & \beta^* \cos 2\theta_s & -\beta^* \sin 2\theta_s \\ \beta \cos 2\theta_s & |\beta|^2 \cos^2 2\theta_s & -\frac{1}{2} |\beta|^2 \sin 4\theta_s \\ -\beta \sin 2\theta_s & -\frac{1}{2} |\beta|^2 \sin 4\theta_s & |\beta|^2 \sin^2 2\theta_s \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}_d(\theta_d) &= \mathbf{R}(\theta_d) \mathbf{T}_d \mathbf{R}(\theta_d) \\ &= f_d \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & \alpha \cos 2\theta_d & -\alpha \sin 2\theta_d \\ \alpha^* \cos 2\theta_d & \cos^2 2\theta_d & -\frac{1}{2} \sin 4\theta_d \\ -\alpha^* \sin 2\theta_d & -\frac{1}{2} \sin 4\theta_d & \sin^2 2\theta_d \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $\mathbf{R}(\theta_{s/d})$ 为绕雷达视线方向旋转矩阵。

$$\mathbf{R}(\theta_{s/d}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta_{s/d} & \sin 2\theta_{s/d} \\ 0 & -\sin 2\theta_{s/d} & \cos 2\theta_{s/d} \end{bmatrix} \quad (4)$$

## 2.2 Neumann 自适应体散射模型

Neumann 使用粒子各向异性( $\delta$ )表征平均粒子在极化平面上的有效形状,当 $|\delta| \rightarrow 0$ 时粒子接近球体或圆盘,当 $|\delta| \rightarrow 1$ 时粒子为偶极子, $|\delta| \rightarrow \infty$ 时粒子趋向于二面角或螺旋体。使用方向随机度( $\tau$ )来表征建模随机过程的圆高斯分布函数, $\tau$ 的定义范围为0~1,其值越大,粒子在极化平面内的分布随机程度越高。本文主要讨论地形坡度变化对极化方向的影响,而体散射描述的是SAR信号在冠层中的平均散射过程,极化方式的变化不会影响其相位中心高度的变化,不影响其散射过程表达,因此可不用考虑地形坡度对体散射模型的影响。则在方位角分布线性近似条件下,Neumann体散射模型的两个线性表达式为:

$$\mathbf{T}_{\text{Neumann}} = \begin{cases} f_v \begin{bmatrix} 1 & (1-\tau)\delta & 0 \\ (1-\tau)\delta^* & \frac{1}{2}|\delta|^2 & 0 \\ 0 & 0 & \tau|\delta|^2 \end{bmatrix} & \tau \leq \frac{1}{2} \\ f_v \begin{bmatrix} 1 & (1-\tau)\delta & 0 \\ (1-\tau)\delta^* & \frac{1}{2}|\delta|^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}|\delta|^2 \end{bmatrix} & \tau > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (5)$$

## 3 双站 PolInSAR 目标的自适应分解

### 3.1 BPTAD 模型的分解框架

双站 PolInSAR 系统由主、辅两部全极化雷达构成,两部雷达从略微不同的两个角度观测同一目标区域,同时获取目标 Sinclair 后向散射矩阵 $\mathbf{S}_1$ 和 $\mathbf{S}_2$ ,假设散射过程满足互易性,则获取的三维 Pauli 散射目标矢量 $\mathbf{k}_1$ 和 $\mathbf{k}_2$ 为:

$$\mathbf{k}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH1} + S_{VV1} \\ S_{HH1} - S_{VV1} \\ 2S_{HV1} \end{bmatrix}; \mathbf{k}_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH2} + S_{VV2} \\ S_{HH2} - S_{VV2} \\ 2S_{HV2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

将上述目标矢量顺序排列,可获得六维目标矢量 $\mathbf{k}_6$ ,目标矢量 $\mathbf{k}_6$ 与自身共轭转置外积得到极化干涉相干矩阵 $\mathbf{T}_6$ 如下:

$$\mathbf{T}_6 = E\{\mathbf{k}_6 \mathbf{k}_6^H\} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{11} & \mathbf{\Omega} \\ \mathbf{\Omega} & \mathbf{T}_{22} \end{bmatrix}; \mathbf{k}_6 = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_1 \\ \mathbf{k}_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

上标 $(\cdot)^H$ 表示矩阵的共轭转置。 $\mathbf{T}_{11}$ 和 $\mathbf{T}_{22}$ 分别是主从影像的极化相干矩阵, $\mathbf{\Omega}$ 是极化干涉矩阵,包

含了两个目标矢量 $\mathbf{k}_1$ 和 $\mathbf{k}_2$ 之间的极化和干涉信息。通常主、辅雷达视角差异较小,可以假设满足极化平稳性,则极化相干矩阵 $\mathbf{T}$ 的极化平稳形式的最大似然估计为<sup>[18]</sup>:

$$\mathbf{T} = \frac{\mathbf{T}_{11} + \mathbf{T}_{22}}{2} \quad (8)$$

假设散射机制之间统计独立,可以将极化相干矩阵 $\mathbf{T}$ 表示为表面散射、二次散射和体散射3种散射机制对应的相干矩阵的线性组合,代入上节提及的相干矩阵,则极化相干矩阵 $\mathbf{T}$ 可表示为:

$$\mathbf{T} = f_d \mathbf{T}_d(\theta_d) + f_s \mathbf{T}_s(\theta_s) + f_v \mathbf{T}_{\text{Neumann}} \quad (9)$$

干涉复相干系数是 PolInSAR 的主要观测信息,与极化方式有关,其表达式为<sup>[19]</sup>:

$$\gamma(\mathbf{w}) = \frac{\mathbf{w}^H \mathbf{\Omega} \mathbf{w}}{\mathbf{w}^H \mathbf{T} \mathbf{w}} \quad (10)$$

其中: $\mathbf{w}$ 是极化投影矢量,代表某一特定组合的极化方式。干涉相干性可以表示为由采集系统和散射介质引起的去相干成分的乘积,其中由散射介质引起的去相干(时间去相干和体去相干)可以分解为不同散射机制去相干的加权线性<sup>[8]</sup>。

$$\gamma(\mathbf{w}) = c_d(\mathbf{w})\gamma_d + c_s(\mathbf{w})\gamma_s + c_v(\mathbf{w})\gamma_v \quad (11)$$

其中: $\gamma_d$ 、 $\gamma_s$ 、 $\gamma_v$ 分别是与二次散射、表面散射和体散射有关去相干。类似的,极化干涉矩阵 $\mathbf{\Omega}$ 可以分解为不同散射机制对应的极化干涉矩阵的线性组合:

$$\mathbf{\Omega} = \mathbf{\Omega}_d + \mathbf{\Omega}_s + \mathbf{\Omega}_v \quad (12)$$

假设所有的干涉去相干与极化方式无关,则上式可以表达为:

$$\mathbf{\Omega} = f_d \mathbf{T}_d(\theta_d)\gamma_d + f_s \mathbf{T}_s(\theta_s)\gamma_s + f_v \mathbf{T}_{\text{Neumann}}\gamma_v \quad (13)$$

单站 PolInSAR 目标分解方法,在短重访周期时不考虑时间去相干的基础上,假设表面散射和二次散射相干性均为1,仅考虑其相位信息<sup>[10-12]</sup>。而在双站 SAR 系统的单发双收集模式中,时间去相干 $\gamma_{\text{temp}} = 1$ ,但主、辅雷达存在极小却不为零的视角差异 $\delta\theta$ ,如图1所示。可以看到由于 $\delta\theta$ 的存在, $P$ 的回波方向偏离了黑色虚线,在二次散射结构的传播路径 $QP$ 上延生了额外的传播距离 $\delta S$ ,而 $\delta S$ 在垂直向上的传播距离,导致存在额外的与高度有关的相位差异,其在垂直向上对高度积分得<sup>[8]</sup>:

$$\begin{aligned} \gamma_d(\text{bis}) &= e^{i\phi_0} \frac{\int_0^{h_v} e^{i\sin^2\theta_k z'} dz' + \int_{-h_v}^0 e^{i\sin^2\theta_k z'} dz'}{2 \int_0^{h_v} dz'} \\ &= e^{i\phi_0} \frac{\sin(\sin^2\theta_k h_v)}{\sin^2\theta_k h_v} \end{aligned} \quad (14)$$



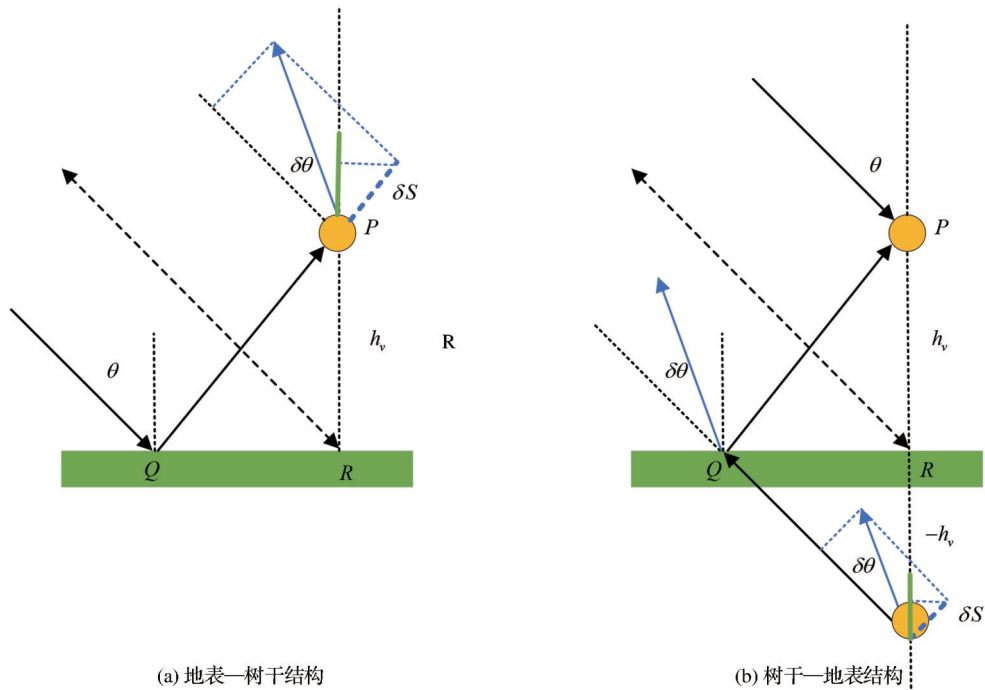


图1 双站 SAR 系统下二次散射相位贡献射线图

Fig.1 Ray diagrams for bistatic dihedral scattering phase contribution

其中:  $k_z$  是有效垂直波数。因此在双站 SAR 系统中二次散射去相干与植被高度相关,不能简单的固定为某个常数,需要作为模型参数纳入分解框架中。而表面散射和体散射都是同一散射单元接受并返回 SAR 信号,不存在结构路径,因此双站 SAR 系统下的表面散射和体散射过程不存在额外的去相干。但本文还是将表面散射去相干作为模型参数纳入分解框架,目的是为了研究垂直向上不同高度分布的表面散射相干性,如冠层和地表的表面散射相干性。则 BPTAD 模型的分解框架为:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_\theta(m) = & \begin{cases} \mathbf{T} = f_d \mathbf{T}_d(\theta_d) + f_s \mathbf{T}_s(\theta_s) + f_v \mathbf{T}_{\text{Neumann}} \\ \boldsymbol{\Omega} = f_d \mathbf{T}_d(\theta_d) \gamma_d(\text{bis}) + f_s \mathbf{T}_s(\theta_s) \gamma_s + f_v \mathbf{T}_{\text{Neumann}} \gamma_v \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

上式共包含 12 个模型参数,分别是  $f_d, \alpha, \theta_d, f_s, \beta, \theta_s, f_v, \delta, \tau, \gamma_d, \gamma_s, \gamma_v$ , 其中前 9 个参数均为极化矩阵建模相关参数,后 3 个参数为与散射机制有关的相干成分。上述模型的参数反演可以表示为求模型矩阵  $\mathbf{T}_\theta(m)$  与极化干涉相干矩阵  $\mathbf{T}_\theta$  之间的最佳拟合,使用残差 Frobenius 范数最小化准则进行优化:

$$\arg \min \left\{ \left\| \mathbf{T}_\theta - \mathbf{T}_\theta(m) \right\|_F \right\} \quad (16)$$

### 3.2 模型解算策略

为了避免局部最优和非物理解情形,本小节将给出合适的数据处理步骤,BPTAD 分解方法的一

般流程如图 1 所示。式(16)的最小值可以通过非线性最小二乘优化方法求解,该方法需要给定参数的初始值和边界条件。基于模型的 PolSAR 目标分解能够给定极化参数  $f_d, \alpha, f_s, \beta, f_v, \delta, \tau$  合适的初值。采用基于圆极化基方法估计地形坡度变化引起的极化方位角偏移<sup>[20]</sup>,作为  $\theta_d$  和  $\theta_s$  的初始值。根据散射模型的构建定义<sup>[5,7]</sup>,给定了极化参数的上下边界。对于参数  $\beta$ ,在大多数自然地表,其虚部远小于实部,故解算时将其相位上下边界设置为接近 0 的较小范围。

通常认为植被区二次散射发生于地表与树干之间<sup>[21-20]</sup>,使用复相干集拟合地表相位给定二次散射相位中心初值,同时认为二次散射相位中心值在其初值上下较小范围内浮动。基于极化通道信息给定表面散射和体散射相干参数初值,并设置上下边界,如体散射使用 HV 极化通道信息。模型参数集的上下边界如表 1 所示。其中,散射总功率  $\text{Span} = T_{11} + T_{22} + T_{33}$ 。  $\Delta l$  设置为 HV 极化通道相位中心的 5%,  $\Delta u$  设置为 lexicographic 基下 HH、HV、VV 3 个极化通道中最高相位中心的两倍<sup>[22]</sup>。

## 4 实验结果与分析

本文分解方法面向双站 SAR 系统,重点对其存在的二次散射额外去相干进行了建模,一大特点是能够获取散射机制的相干成分。由于目前 LT-1 等

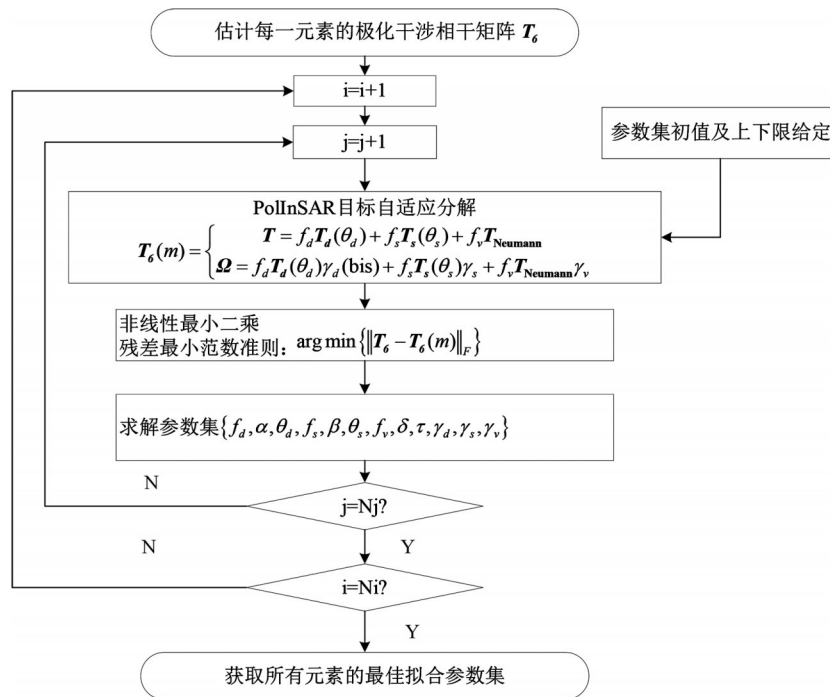


图2 分解算法流程图

Fig.2 Flow chart of decomposition algorithm

表1 模型参数的上下边界

Table 1 Lower and upper bounds of model unknowns

参数	下边界	上边界	参数	下边界	上边界
$f_d$	0	Span	$ \delta $	0	1
$ \alpha ^2$	0	1	$\arg(\delta)$	$-\pi$	$\pi$
$\arg(\alpha)$	$-\pi$	$\pi$	$\tau$	0	1
$f_s$	0	Span	$ \gamma_d $	0	1
$ \beta ^2$	0	1	$\arg(\gamma_d)$	$\phi_0 - 5\pi/180$	$\phi_0 + 5\pi/180$
$\arg(\beta)$	$-5\pi/180$	$5\pi/180$	$ \gamma_s $	0	1
$\theta_d$	$-\pi/4$	$\pi/4$	$\arg(\gamma_s)$	$\phi_0 - \Delta l$	$\phi_0 + \Delta u$
$\theta_s$	$-\pi/4$	$\pi/4$	$ \gamma_v $	0	1
$f_v$	0	Span	$\arg(\gamma_v)$	$\phi_0$	$\phi_0 + 2\pi$

长波双站SAR卫星数据暂未开放,因此无法直接使用双站PolInSAR数据对方法进行测试。但单站重轨数据中二次散射、表面散射等散射机制也存在由于时间变化、采集系统等引起的去相干<sup>[23]</sup>,因此使用单站重轨数据对BPTAD分解方法进行测试,分析获取的散射机制相干成分,若符合单站SAR系统特性和自然场景分布情况,即能说明BPTAD分解方法对散射机制相干成分建模的有效性,能应用于双站PolInSAR数据。基于此,本节使用了BioSAR 2008项目提供的E-SAR机载SAR系统获取的L波段全极化数据。试验场位于瑞典北部的Krycklan流域,该区域是典型的北方森林,森林类型包括苏格兰松和挪威云杉等针叶林及少部分桦树<sup>[24]</sup>。

选择了水平基线为6 m的干涉影像,截取了包含森林、草地或空地以及道路的影像区域,其Pauli基彩色合成图和光学卫星遥感影像如图3所示。

选取沿方位向分布的一系列场景数据,如图3红线所示,可以看到其从左至右依次经过了森林、草地或空地和道路等3种自然场景,以下分析围绕该列数据进行。图4(a)为表面散射、二次散射和体散射3种散射机制的总功率贡献。180、1 200和1 400像素前后分别对应于场景中的草地和道路。可以看到在180和1 200处体散射功率贡献较其它区域明显降低,表面散射功率贡献占据主导地位,与实际自然场景对应。但1 400像素处出现异常,即位于道路区域但表面散射功率贡献却极低,结合光学遥感影像可知,1 400像素区域处道路宽度有限且两侧有高大密集的植被,而在滤波过程数据分辨率降低,导致表面散射难以识别,其功率贡献低于正常值。但此区域体散射功率贡献出现明显的波谷值,说明存在非植被区,分解过程能够准确检测到不同场景的变化。利用不同极化方式对目标结构敏感性不同,可以在特定极化通道中研究某一散射机制贡献的强度变化,更好地反应分解方法对不同散射机制的识别性。如图3(b)所示,在HH+VV极化互相关通道中,1 400像素区域表面散射的功率贡献明显大于体散射功率贡献。在图3(c)HH-VV极化

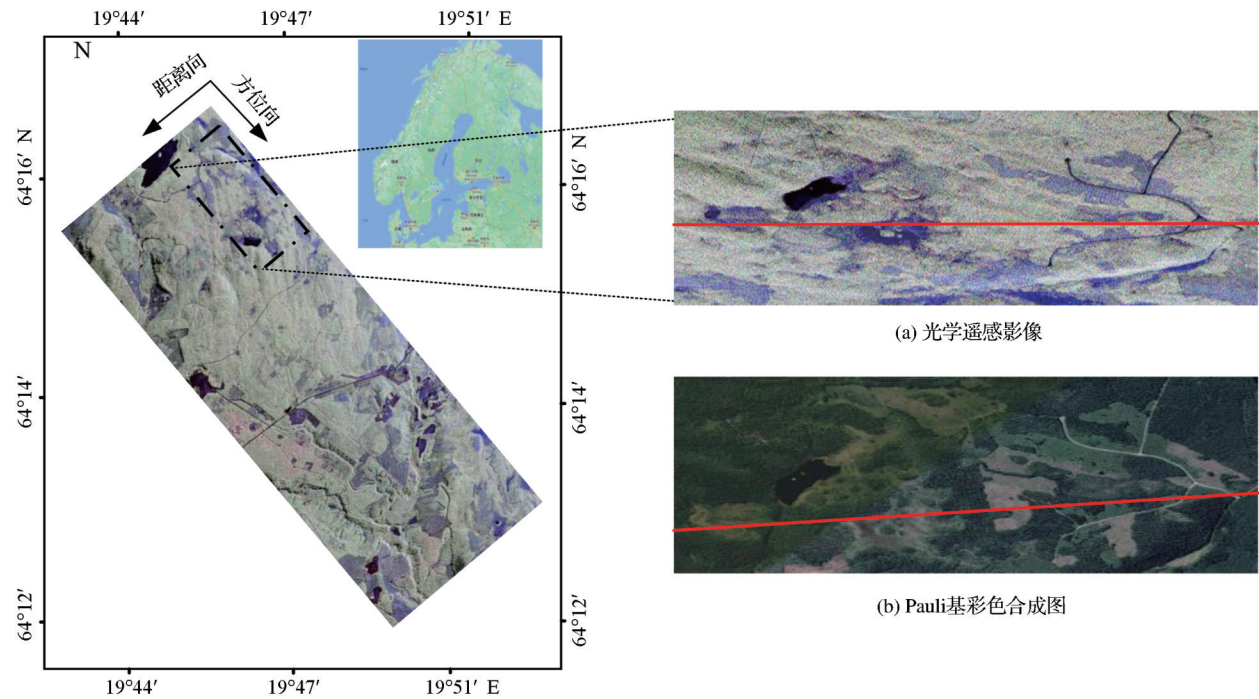


图 3 研究区域图像

Fig.3 Study area images of optical remote sensing images and Pauli base color composite

互相关通道中,二次散射主要发生于植被区域的地表与树干结构之间,在草地和道路区域,其功率贡献也存在明显的波谷值。进一步将实验区整体的 Freeman-Durden 三分

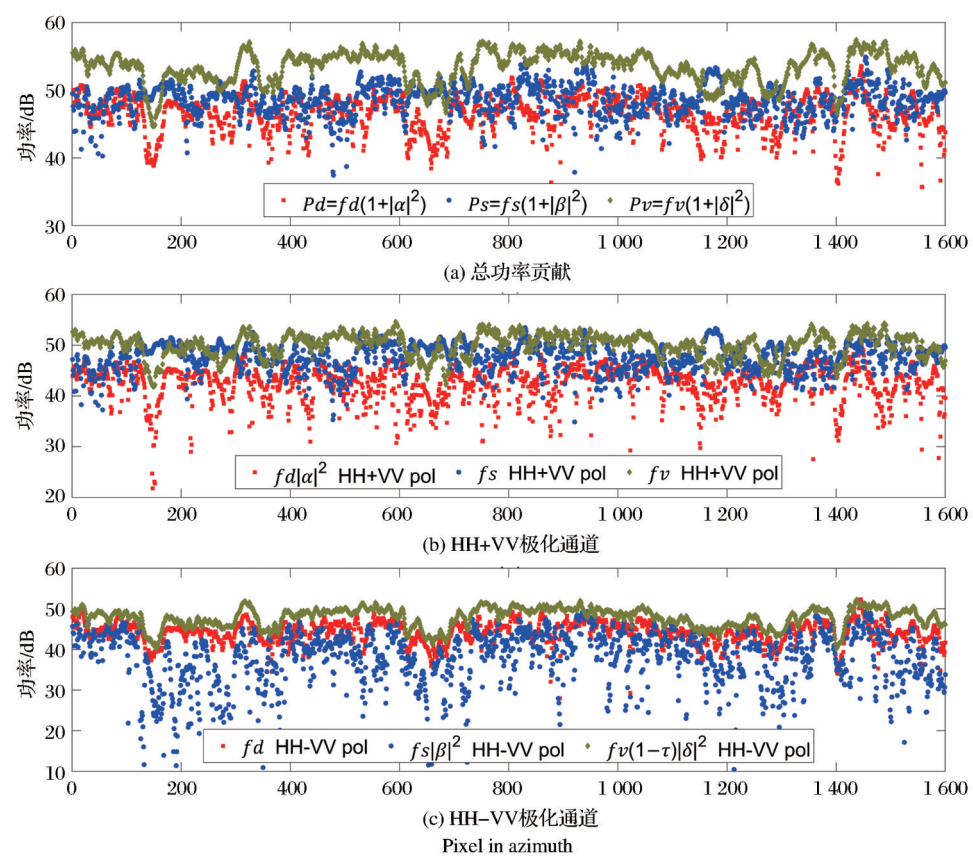


图 4 3 种散射机制功率贡献剖面图

Fig.4 Power contribution profiles of three scattering mechanisms



量分解结果与BPTAD分解结果进行比较验证,为比较公平,在应用Freeman-Durden三分量分解前已对数据做了POA补偿。图5(a)~图5(d)分别是BPTAD分解和Freeman-Durden三分量分解获取的表面散射和二次散射功率贡献与总散射功率的比值。两种方法识别的表面散射和二次散射发生的主要区域较为一致,表面散射均对应于自然场景中的草地、道路,二次散射均对应于自然场景中的植被区,低矮植被区功率贡献占比更大。但BPTAD分解对植被区中较弱的表面散射和二次散射功率贡献也能较好的捕捉,表现为在整体上更有连

贯性,这与植被区后向散射信号是多种散射机制的混合响应的预测是一致的,表明BPTAD分解方法能有效识别和区分植被区的3种散射机制。同时,结合图5(e)~图5(h)可以看到BPTAD分解获取的体散射功率贡献明显低于Freeman-Durden三分量分解,有效缓解了因交叉极化通道功率只归于体散射而造成的高估现象。总体上看,体散射功率贡献占比从76.9%降低至65.1%,表面散射和二次散射功率贡献占比分别增加了6.1%和5.7%。表明引入POA偏移的表面散射和二次散射模型有效吸收了地形坡度变化产生的交叉极化通道功率。

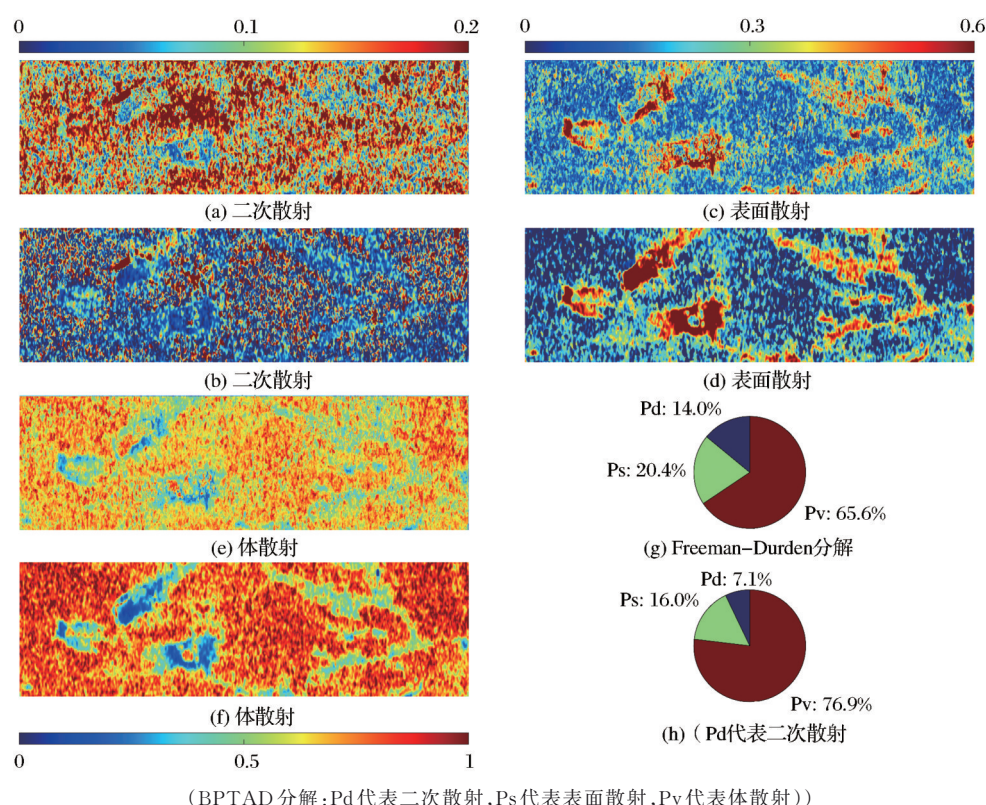


图5 两种分解方法获取的各散射机制功率比例分布图与饼状图

Fig.5 Power ratio distribution and pie chart of each scattering mechanism obtained by two decomposition methods

3种散射机制平均相位中心在垂直向上的分布情况如图6(a)所示。基于求解时施加的物理约束,可以看到二次散射相位中心高度在地表上下浮动。在180、1200元素处,表面散射和体散射的相位中心高度均近乎位于地表,在1400处,体散射相位中心高度虽然较高,但存在明显波谷值。表明3种散射机制的相位中心高度与实际场景变化有良好的——对应。同时注意到在植被区,表面散射机制相位中心高度分布多变,并不是单一的位于冠层或者是地表。其在总体上呈现出与体散射相位中心高度一致的变化趋势。结合图6(b)激光雷达(Light

Detection and Ranging, LiDAR)获取的植被高度,可以发现表面散射相位中心高度分布与植被高度密切相关,当植被高度较低时( $\leq 10$  m),表面散射相位中心接近于地表,当植被高度较高时( $> 10$  m),表面散射相位中心相对于体散射相位中心更接近于植被顶部,表明植被区表面散射机制的产生区域与植被高度和穿透程度存在一定关联。为评估相位中心高度估计的有效性,将分解获取的体散射相位中心高度与LiDAR获取植被高度作对比分析,如图6(b)所示。可以看到二者有极为一致的变化趋势,体散射相位中心高度的变化能在一定

程度上反应植被高度的变化,对植被高度的变化敏感,见350、650、1 400像素前后。但在连续较高的植被区域,体散射相位中心高度存在明显的低估,出现多个波谷值,结合上文道路区域分析,可以将该现象可归因于树木之间的空隙穿透,即存在部分信号穿透到地表,并未在冠层发生体散射。结合图6(a)和图6(c),可以看到在400~600、800~1 000像素区域,即连续较高的植被区域中,存在部分像素区域表面散射相干性较高且相位中心位于地表,正对应于体散射相位中心高度出现波谷值的像素区域,说明在该像素区域存在穿透到地表的信号,在滤波过程中,导致体散射相位中心出现了低估。图7为研究区域3种散射机制的相干性图,由图7(a)可以看到除水域部分之外,二次散射的相干性均较高,接近于1,本文使用的单站数据空间基线和时间基线均较短,因此分解结果符合数据特征和自然场景分布。表面散射相干性整体略低于二次散射,在道路和低矮植被区其相干性接近于1。而在植被区表面散射相干性有明显降低,但均大于体散射去相干。结合图6(a)表面散射相位中心高度的分布情况,在植被高度 $>10$  m时,表面散射相位中心高度位于冠层,可以推测表面散射发生于一定密度分布

下的冠层区域,该区域的介质性质与大气差异较大,已足以发生表面散射,区域应介于体散射相位中心高度与树冠顶部之间。

因此在植被区表面散射存在部分的结构去相干,导致其相干性有所降低但又始终高于体散射相干性。体散射机制去相干与植被垂直结构直接关联,是估计植被高度相关的重要参数。结合图6和图7(c)可以看到体散射相干性分布与森林高度分布有较强的关联性。表现为植被较高时体散射相干性较低,植被较矮时体散射相干性较高,在总体上明显低于其它两种散射机制,表明了分解获取的体散射相干性的可靠性。

## 5 结 论

本文面向双站SAR系统的特点和优势,提出了双站PolInSAR目标自适应分解方法,使用BioSAR 2008项目提供的机载L波段全极化数据进行了测试。实验表明,该分解方法能较好地识别和区分植被区的不同散射过程,表现为:①分解获取的不同散射机制的功率占比符合不同地物类型,如草坪、道路区域表面散射功率贡献占主导,植被区域体散射功率贡献占主导;②准确捕捉了植被区存在的较

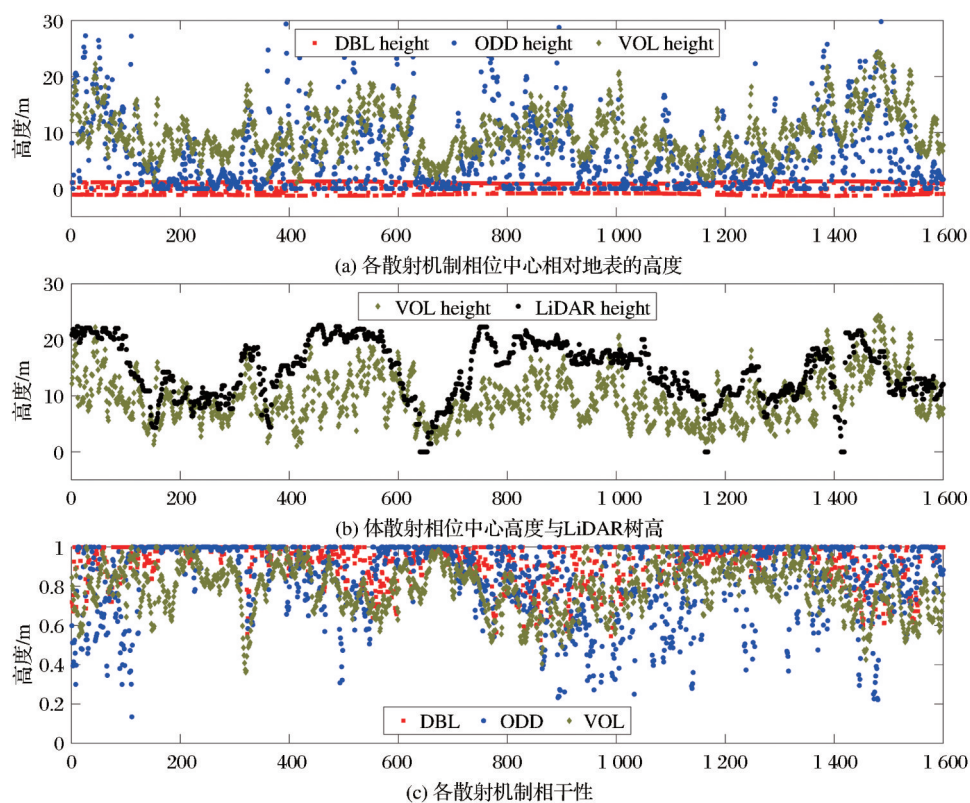


图6 各散射机制的相位及相干性剖面图

Fig.6 Phase and coherence profiles of each scattering mechanism



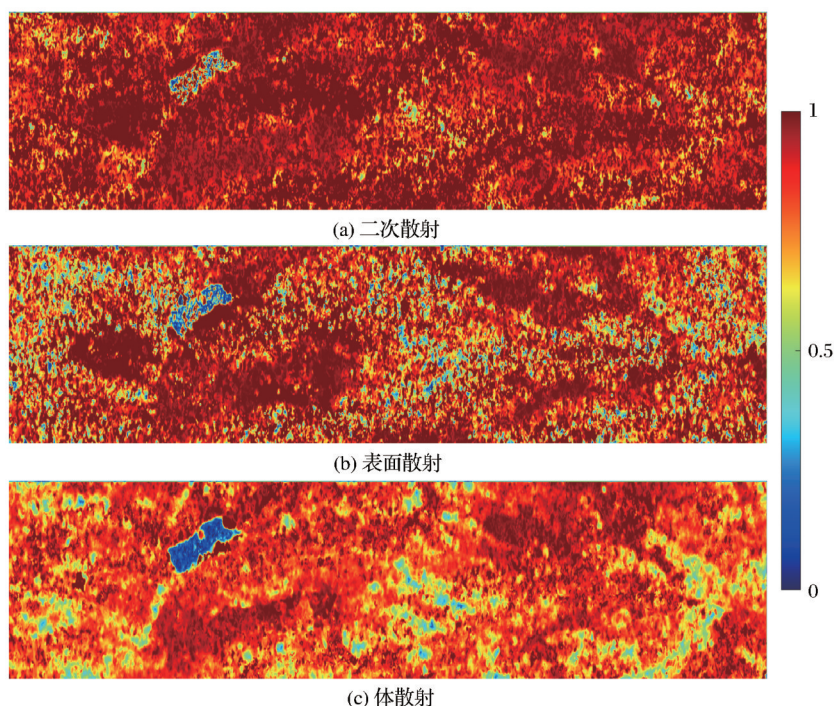


图7 各散射机制的相干性分布图

Fig.7 Coherence distribution map of each scattering mechanism

弱的表面散射和二次散射功率贡献,表现为相较于传统的Freeman三分量分解,在植被覆盖区,本文分解方法获取的二次散射和表现散射功率贡献占比提高;③有效抑制了体散射功率贡献高估的现象。表明BPTAD分解对植被场景刻画的有效性和潜力。同时分解方法有效反演了不同散射机制的相干成分以及相位中心高度分布情况。①表面散射相位中心高度分布与植被高度和穿透程度存在联系,表现为当植被高度 $\leq 10$  m时,相位中心接近于地表,当植被高度 $> 10$  m,相位中心接近于冠层。且表面散射相位中心高度的分布与相干性分布趋势有良好的一致性,表现为位于地表的相干性较高,接近冠层的相干性较低,结合植被覆盖区特点,我们分析,部分信号穿透森林缝隙抵达地表,在地表发生表面散射,因此相干性较高,部分信号在在接近冠层的主要枝干发生表面散射,冠层结构削弱了其相干性。②体散射相位中心高度接近于机载LiDAR植被高,且二者有极为一致的变化趋势,表明本文分解获取的体散射相位中心高度分布符合实际植被分布情况,具有较高的可靠性。③3种散射机制的相干性分布符合数据特征和自然林区分布。

面向LT-1等长波的星载双站SAR系统,将面临大范围的区域反演解算,在保证算法适应性的同时,简化参数反演过程,更高质量更效率的解算

是未来研究的重点。

#### 参考文献(References):

- [1] SUN Yafei, JIANG Liming, LIU Lin, *et al.* Generating and evaluating digital terrain model with TanDEM-X bistatic SAR interferometry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(1): 100-105.[孙亚飞, 江利明, 柳林, 等. TanDEM-X双站InSAR地形提取及精度评估[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2016, 41(1): 100-105.]
- [2] CHEN S W, LI Y Z, WANG X S, *et al.* Modeling and interpretation of scattering mechanisms in polarimetric Synthetic Aperture Radar: Advances and perspectives[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(4): 79-89.
- [3] HAN W, FU H, ZHU J, *et al.* A compound volume scattering model with emphasis on the morphological diversity of vegetation canopy scatterers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 12104-12113.
- [4] WANG Xuesong, CHEN Siwei. Polarimetric synthetic aperture radar interpretation and recognition: Advances and perspectives[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(2): 259-276.[王雪松, 陈思伟. 合成孔径雷达极化成像解译识别技术的进展与展望[J]. *雷达学报*, 2020, 9(2): 259-276.]
- [5] FREEMAN A, DURDEN S L. A Three-component scatter-

- ing model for polarimetric sar data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(3): 963-973.
- [6] VANZYL J J. Synthetic aperture radar polarimetry [M]. Hoboken, NJ: Wiley, 2011.
- [7] NEUMANN M, FERRO-FAMMIL L, POTTIER E. A general model-based polarimetric decomposition scheme for vegetated areas [C] //Proceedings of the 4th International Work-shop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry (ESRIN), Frascati, Italy, 2009: 26-30.
- [8] NEUMANN M. Remote sensing of vegetation using multi-baseline polarimetric SAR interferometry: Theoretical modeling and physical parameter retrieval[D]. Berlin: Berlin University of Technology, Germany, 2010.
- [9] CHEN S W, WANG X S, XIAO S P, *et al.* General polarimetric model-based decomposition for coherency matrix [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 52(3): 1843-1855.
- [10] BALLESTER-BERMAN J D, LOPEZ-SANCHEZ J M. Applying the Freeman-Durden decomposition concept to polarimetric SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 48(1): 466-479.
- [11] 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.
- [12] GUO S, LI Y, ZHANG J, *et al.* Modification of polarimetric SAR interferometry target decomposition with accurate topography[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(7): 1476-1480.
- [13] LEE J S, POTTIER E. Polarimetric radar imaging: From basics to applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [14] YAMAGUCHI Y, YAJIMA Y, YAMADA H, *et al.* A four-component decomposition of PolSAR images based on the coherency matrix[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(3): 292-296.
- [15] ARII M, VAN ZYL J, KIM Y. Improvement of adaptive-model based decomposition with polarization orientation compensation [C] //2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2012: 95-98.
- [16] LEE J S, SCHULER D L, AINSWORTH T L. Polarimetric SAR data compensation for terrain azimuth slope variation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2153-2163.
- [17] LEE J S, SCHULER D L, AINSWORTH T L, *et al.* On the estimation of radar polarization orientation shifts induced by terrain slopes [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(1): 30-41.
- [18] NEUMANN M, FERRO-FAMIL L, REIGBER A. Estimation of forest structure, ground, and canopy layer characteristics from multibaseline polarimetric interferometric SAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 48(3): 1086-1104.
- [19] PAPATHANASSIOU K P, CLOUDE S R. Single-baseline polarimetric SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11): 2352-2363.
- [20] LEE J S, SCHULER D L, AINSWORTH T L. Polarimetric SAR data compensation for terrain azimuth slope variation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2153-2163.
- [21] FERRO-FAMIL L, NEUMANN M. Recent advances in the derivation of PolInSAR statistics: Study and applications[C] //7th European Conference on Synthetic Aperture Radar. VDE, 2008: 1-4.
- [22] BALLESTER-BERMAN J D, LOPEZ-SANCHEZ J M, VICENTE-GUIJALBA F. Follow-up investigations on model-based PolInSAR techniques[C] //EUSAR 2014; 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar. VDE, 2014: 1-4.
- [23] LI Deren, YANG Jie. Principle and applications of extracting DEM from SAR [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2002, 22(2): 1-6. [李德仁, 杨杰. 从卫星雷达提取地面高程信息的原理与应用 [J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(2): 1-6.]
- [24] KELLNDORFER J M, WALKER W S, LAPOINT E, *et al.* Statistical fusion of LiDAR, InSAR, and optical remote sensing data for forest stand height characterization: A regional-scale method based on LVIS, SRTM, Landsat ETM+, and ancillary data sets [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2010, 115(G2): 1-10.

## Adaptive Decomposition of Long-Wave PolInSAR Targets for The Bistatic SAR System

FU Longchong<sup>1</sup>, ZHU Jianjun<sup>1</sup>, FU Haiqiang<sup>1</sup>, XIE Qinghua<sup>2</sup>, HAN Wentao<sup>1</sup>

(1.School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2.School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan),  
Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The Bistatic SAR system has no temporal decoherence, and combined with the powerful penetration capability of long wave, it has great prospects for application in estimating vegetation structure parameters. Using polarimetric interferometric SAR decomposition technique to study the scattering process of vegetation area in bistatic SAR system is of great significance for revealing the interaction between signal and ground object and constructing the inversion model of vegetation structure parameters. Considering the applicability of the model and the non-negligible decoherence in bistatic SAR system, the polarization interference matrix is expressed as the sum of the product of the polarization azimuth-extended generalized surface scattering matrix, the generalized quadratic scattering matrix and the Neumann adaptive volume scattering matrix with their corresponding coherent components. Solving all model parameters simultaneously using nonlinear least squares optimization technique based on residual least squares criterion. The method is tested using L-band fully polarimetric airborne data from the BioSAR 2008 project. The coherent components, phase distribution and energy information of different scattering mechanisms in the experimental area are obtained and analyzed with airborne lidar data. The results show that the decomposition method can well distinguish different scattering mechanisms in vegetation area, effectively suppress the overestimation of volume scattering power, and better fit with the actual data. The vertical distribution of surface scattering in the vegetation area is related to the vegetation height and penetration degree. The height of the volume scattering phase center is close to and the trend is consistent with the vegetation height of the airborne lidar. The coherence of the scattering mechanism is effectively estimated.

**Key words:** The Bistatic SAR polarimetric interferometry; Long wave; Adaptive decomposition of target; Scattering mechanism of vegetation zone