

基于去相干敏感因子的多基线 PolInSAR 植被高度反演方法

王意军¹, 宋天祯², 李威¹, 汪长城², 纪鹏¹

(1. 上海卫星工程研究所, 上海 201109; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083)

摘要: 极化干涉合成孔径雷达(PolInSAR)技术通过建立相关质量评价指标筛选最优干涉几何,从而实现多基线植被高度反演。但目前使用的相干性特性、测高精度等质量指标并未关联与干涉几何直接相关的垂直波数,容易降低干涉几何选取的稳健性。本文提出一种基于去相干敏感因子的多基线 PolInSAR 植被高度反演方法,利用敏感因子描述干涉几何与植被高度的匹配程度,从多个单基线固定消光方法中确定最佳植被高度反演结果。使用欧洲航天局 AfriSAR 2016 项目的 P 波段合成孔径雷达(SAR)数据进行实验验证。实验结果表明:以激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)获取的植被高度作为参考,本文多基线反演算法的均方根误差为 6.19 m,比其他两种传统方法精度分别提高了约 14.14% 和 13.55%。

关键词: 多基线; 极化干涉合成孔径雷达; 多基线反演; 植被高度; 垂直波数; 去相干系数

中图分类号: P 237 文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.06.003

Multi-baseline PolInSAR Vegetation Height Inversion Method Based on Decorrelation Sensitivity Factor

WANG Yijun¹, SONG Tianyi², LI Wei¹, WANG Changcheng², JI Peng¹

(1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Polarimetric interferometric synthetic aperture radar (PolInSAR) technology carries out multi-baseline vegetation height inversion by using relevant quality evaluation index to select the optimal interferometric geometry. However, the currently used quality indices such as coherence separation product and height accuracy are not associated with the vertical wavenumber directly related to the interferometric geometry, which may reduce the robustness of the interferometric geometry selection. This paper proposes a multi-baseline PolInSAR vegetation height inversion method based on decorrelation sensitivity factor, which can describe the matching degree between interferometric geometry and vegetation height. The optimal vegetation height is determined from multiple single-baseline inversion results using fixed extinction coefficient method. This paper uses P-band synthetic aperture radar (SAR) data collected by the European Space Agency AfriSAR 2016 campaign for experimental validation. The experimental results show that with the light detection and ranging (LiDAR) vegetation height as a reference, the root mean squared error (RMSE) of the proposed multi-baseline inversion algorithm is 6.19 m, which is about 14.14% and 13.55% higher than those of the other two traditional methods.

Key words: multi-baseline; polarimetric interferometric synthetic aperture radar (PolInSAR); multi-baseline inversion; vegetation height; vertical wavenumber; decorrelation coefficient

收稿日期: 2020-11-06; 修回日期: 2021-01-14

基金项目: 上海航天科技创新基金(SAST2018-033)

作者简介: 王意军(1978—), 男, 硕士, 主要研究方向为星载 SAR 卫星总体设计。

通信作者: 宋天祯(1997—), 男, 硕士, 主要研究方向为极化干涉 SAR、层析 SAR 数据处理。

0 引言

森林作为地球上最大的陆地生态系统,对维持地球的生态平衡有着至关重要的作用,特别是在碳循环中,其通过植物的光合与呼吸作用有效地调节着碳元素在动物以及植物和环境之间的迁移。获取植被高度、生物量等参数可用于资源管理和科学研究。传统的植被高度数据采集主要对选定的地面采样点进行实地测量,可靠性低,且难以对森林进行大范围、可持续的监测,无法满足现代森林监测发展的需要。

极化干涉合成孔径雷达(Polarimetric Interferometric Synthetic Aperture Radar, PolInSAR)技术有效结合了干涉合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)对目标散射体空间分布、高度的敏感性和极化 SAR 对目标散射体方向、形状的敏感性^[1],可实现对植被区域全天时、全天候、高分辨率的观测与参数提取^[2],是现代自然资源监测的先进手段之一。

PolInSAR 技术实现植被高度反演的关键是建立 PolInSAR 观测量与植被散射过程中几何、物理参数之间的关系,即植被极化相干散射模型。目前,随机地体二层散射(Random Volume over Ground, RVoG)模型是使用最为广泛且最具代表性的植被极化相干散射模型,它的出现可追溯到 1996 年, TREUHAFT 等^[3]考虑了植被变化对相干性的影响,初步建立了干涉复相干性与植被高度、地体幅度比、消光系数等植被生物物理参数之间的函数关系,从而提出 RVoG 模型。2000 年, TREUHAFT 等^[4]又将极化状态加入该模型的构建当中。

基于 RVoG 模型,相关学者提出大量植被高度反演方法。2001 年, PPATHANASSIOU 等^[5]将 PolInSAR 提供的 3 个独立复相干系数作为观测量,提出六维非线性迭代算法。但该算法的反演结果过于依赖迭代初值的选取,且易陷入局部最优。不仅如此,随着不断迭代,观测值还会趋近于线性相关而出现病态问题。为解决六维非线性迭代算法存在的上述缺陷, CLOUDE 等^[6]于 2003 年提出三阶段算法, DUBOIS-FERNANDEZ 等^[7-8]于 2008 年对传统三阶段算法进行改进,提出固定消光系数法。这类算法顾及 RVoG 模型的几何特性,首先通过复相干系数直线拟合获取相干直线,之后判定地表相

位,最后为减少解算中的未知参数,采用固定参数法,分别固定地体幅度比^[6]和消光系数^[7-8],建立二维查找表计算植被高度。此外,朱建军^[1]、付海强等^[9-10]将最小二乘方法推广到复数域,提出单基线复数最小二乘 PolInSAR 植被高度反演方法。

研究表明,不同植被高度存在一个最优的干涉几何,每个基线(干涉对)的干涉几何与其垂直向有效波数直接相关,同时,垂直波数也揭示了纯体去相干对植被高度的反演影响程度^[11]。单基线反演中单一的干涉几何无法对应复杂的真实森林场景,且不能提供足够多的观测信息用于 RVoG 模型的解算,极大限制了植被高度反演的结果精度。因此,需要增加干涉几何的个数,采用多基线数据反演植被高度。目前常用的解算思路是建立一种质量评价指标,据此判定最优干涉几何用于多基线植被高度反演,然而传统的多基线质量评价指标(如测高精度^[12-13]、相干性特性^[13]等)未考虑与干涉几何直接相关的垂直波数,以及垂直波数本身与仅包含植被冠层散射能量贡献的纯体去相干系数之间的关系,无法捕捉到使一个基线(干涉对)比其他基线(干涉对)反演出更高精度植被高度的根本特征,仅通过间接判断也难以确定与植被高度最相符的干涉几何。

综上所述,本文在研究垂直向有效波数对于植被高度反演影响的基础上,提出基于去相干敏感因子的多基线 PolInSAR 植被高度反演方法,有效选取了干涉几何匹配程度最优的垂直波数-植被高度组合,并从多个单基线固定消光系数法反演的植被高度中确定最佳树高反演结果。为验证算法的优越性,本文使用 AfriSAR 2016 项目所采集的覆盖非洲加蓬 Mabounie 地区的 4 景 P 波段全极化 SAR 数据进行多基线植被高度反演实验,并与两种传统多基线反演算法进行精度比较与分析。

1 算法模型与原理

1.1 随机地体二层散射模型(RVoG 模型)

RVoG 模型将植被区域抽象表示为包含植被层与地表的 2 层结构体,是目前最为常用的植被极化相干散射模型^[4-6,8-14,16-18]。其通过对散射体结构的适当假设,将 PolInSAR 观测量与植被生物物理参数建立的表达式如下^[5]:

$$\left\{ \begin{aligned} \gamma(\omega) &= e^{i\phi_0} \frac{\gamma_v + \mu(\omega)}{1 + \mu(\omega)} \\ \gamma_v &= \frac{\int_0^{h_v} e^{2\sigma z / \cos\theta + ik_z z} dz}{\int_0^{h_v} e^{2\sigma z / \cos\theta} dz} = \\ &= \frac{2\sigma(e^{2\sigma h_v / \cos\theta + ik_z h_v} - 1)}{(2\sigma + ik_z \cos\theta)(e^{2\sigma h_v / \cos\theta} - 1)} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: ω 为不同的极化方式; $\gamma(\omega)$ 为极化方式 ω 对应的复相干系数; ϕ_0 为地表相位; γ_v 为仅包含植被冠层体散射能量贡献的纯体去相干系数; $\mu(\omega)$ 为不同的极化方式 ω 对应的地体幅度比, 表征地表散射能量与植被冠层体散射能量之比; σ 为消光系数, 是微波在植被场景传播过程中的衰减, 主要与微波频率和森林场景属性(如介电常数、植被结构、密度)有关; h_v 为植被高度; θ 为雷达入射角; k_z 为垂直向有效波数, 在单站情况下可表示为^[15]

$$k_z = \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R \sin\theta} \quad (2)$$

式中: B_{\perp} 为垂直基线; λ 为雷达波长; R 为传感器与观测目标之间的斜距。

垂直波数是 PolInSAR 植被高度反演中最为关键的参数之一, 其与多基线反演结果精度直接相关。已有研究表明, 对于高大植被, 若垂直波数过大, 植被高度反演会在某一高度处达到饱和, 反演结果出现低估; 对于低矮植被, 若垂直波数过小, 较小的残余非体去相干甚至会引起较大的高度误差^[11]。因此, 获得高精度的植被高度反演结果取决于合适的垂直波数(基线、干涉对)选择。

1.2 固定消光系数法

在传统 PolInSAR 多基线植被高度反演中, 得到最优的观测几何后, 采用传统三阶段算法进行单基线解算。但本文采用的 P 波段 SAR 数据穿透性较强, 雷达观测的植被场景中会存在较大的地表散射贡献, 不满足极化通道中的地体幅度比小于 -10 dB 的要求, 传统三阶段算法中“ $\mu(\omega)=0$ ”的假设不再成立, 需要将具体幅度比参数化。因此, 本文采用更适于 P 波段 SAR 数据植被高度反演的固定消光系数法进行单基线解算, 并将算法流程调整为: 单基线固定消光系数法反演植被高度后, 再通过质量评价指标选取匹配程度最优的垂直波数-植被高度

组合, 以提高算法的稳健性。固定消光系数三阶段算法的主要步骤如下:

步骤 1 相干直线拟合。在 RVoG 模型的理论框架下, 不同极化方式得到的复相干系数形成的复相干区域应为复单位圆上的 1 条直线, 而真实情况会存在噪声等因素的干扰, 使得复相干系数不在一条直线上, 分散分布, 需对复相干系数进行直线拟合。传统方法对 5 种线性极化(HH、HV、VV、HH+VV、HH-VV)对应的复相干系数进行整体最小二乘, 易被包含的混合散射贡献所影响。因此, 本文采用更稳健的相位分离算法^[16]得到的复相干系数 γ_{pdh} 和 γ_{pdl} 进行两点拟合相干直线。

步骤 2 地表相位估计。拟合的相干直线与复单位圆存在 2 个交点 ϕ_1 、 ϕ_2 , 其中之一为植被高度反演所需的地表相位。传统三阶段算法利用线性极化复相干系数距离地表相位点远近的先验信息估计地表相位, 过于依赖先验距离信息的准确度, 稳定性不佳。本文采用一种新型地表相位估计准则, 从 2 个交点之中选择地表相位点^[11]为

$$\left\{ \begin{aligned} k_z > 0 \\ &(\exp(i\phi_1)\exp(i\phi_2)^*) > 0, \phi_0 = \phi_1 \\ &(\exp(i\phi_1)\exp(i\phi_2)^*) < 0, \phi_0 = \phi_2 \\ k_z < 0 \\ &(\exp(i\phi_1)\exp(i\phi_2)^*) < 0, \phi_0 = \phi_1 \\ &(\exp(i\phi_1)\exp(i\phi_2)^*) > 0, \phi_0 = \phi_2 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

步骤 3 植被高度估计。根据前 2 步得到的参数结果, 结合体散射能量占优的复相干系数可反演植被高度。与传统三阶段中构造植被高度-消光系数二维查找表不同, 固定消光系数法根据先验知识为消光系数定值, 并建立植被高度-地体幅度比二维查找表, 将地体幅度比作为未知参数求解。对于本文所选的热带雨林研究区, 将消光系数固定为 0.1 dB/m 可达到较好的植被高度反演结果^[17]。

1.3 基于去相干敏感因子的多基线算法

1.3.1 去相干敏感因子指标

目前, 多基线 PolInSAR 植被高度反演的质量评价指标主要包括相干性特性指标^[13]、测高精度指标^[12-13]和相干区域边界偏心率指标^[12-13]等。传统指标未充分考虑纯体去相干本身对垂直波数的敏感性, 而垂直波数揭示了纯体去相干对植被高度的反演影响程度。作为纯体去相干系数的构造参数, 植

被高度与垂直波数之间存在着一定的内在匹配关系,即不同的植被高度需要选择与其干涉几何最相符(匹配程度最优)的垂直波数(基线、干涉对)。2018年,LEE等^[18]在研究垂直波数对树高反演影响的基础上,提出去相干敏感因子diff的概念:

$$D_{\text{diff}} = \frac{d|\gamma_v(h_v; k_z)|}{dk_z} \quad (4)$$

将其运用到多基线植被高度反演当中。

在消光系数固定为0.1 dB/m的情况下,对于不同的植被高度,敏感因子随垂直波数的变化情况如图1所示。图1中,黑线—10 m,红线—20 m,绿线—30 m,蓝线—40 m,黄线—50 m。由图可知,对于给定的植被高度,垂直波数的增大首先会导致纯体去相干-垂直波数敏感度增强,在敏感因子最大值(图1中实心圆点)处达到最强。此时的垂直波数与该植被高度干涉几何的匹配程度最佳,之后纯体去相干-垂直波数敏感度渐渐变弱,直至最大容许垂直波数($2\pi/h_v$)时达到饱和。

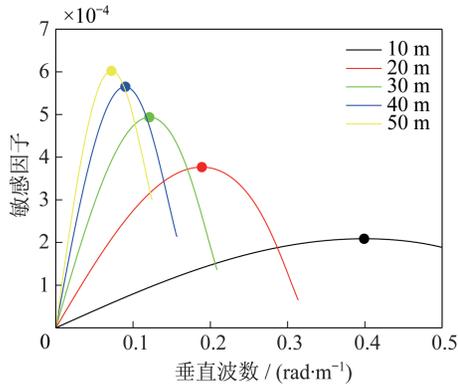


图1 敏感因子与垂直波数变化关系

Fig.1 Variation of the sensitivity factor with the vertical wave number

在LEE等^[18]的研究中,反演精度十分依赖于植被高度的先验信息,将航天飞机雷达地形测绘任务(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)生成的植被高度产品作为先验植被高度信息。然而,该产品的空间分辨率较低且垂直向精度较差,极大限制了反演性能。

综上所述,在LEE等^[18]的研究基础上,本文建议将去相干敏感因子作为一个全新的质量评价指标用于最优干涉几何选取。对于每个像素,根据单基线固定消光系数法得到的树高和每个基线的垂直波数,计算相应基线的去相干敏感因子,该指标

用于描述植被高度与垂直向有效波数之间的内在干涉几何匹配关系,通过判断选择去相干敏感因子值最大的单基线植被高度反演结果作为该像素的最佳植被高度。相应的多基线联合反演函数为

$$o_{\text{opt}} = \underset{i}{\operatorname{argmax}} \left\| \begin{array}{c} D_{\text{diff}}^1(h_v^1; k_z^1) \\ D_{\text{diff}}^2(h_v^2; k_z^2) \\ \dots \\ D_{\text{diff}}^N(h_v^N; k_z^N) \end{array} \right\|, i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

1.3.2 本文多基线植被高度反演算法流程

本文算法的主要步骤如下:

步骤1 对每个基线的散射矩阵进行极化干涉处理,生成极化相干矩阵 T ,同时对影像数据进行去平、多视、滤波、相干性估计等预处理。

步骤2 采用固定消光系数法,将消光系数固定为0.1 dB/m,通过固定消光系数三阶段算法的3个步骤,得到每个基线的单基线反演结果。

步骤3 根据步骤2得到的树高和每个基线的垂直波数,逐像素计算相应基线的去相干敏感因子。由于低相干性会导致较大的相位方差或植被高度方差,降低反演精度,对相干性小于0.3的像素进行了掩膜处理。之后,根据评价准则选取去相干敏感因子值最大,即干涉几何匹配程度最高的垂直波数-植被高度组合,将该植被高度作为该像素的多基线植被高度反演结果。算法流程如图2所示。

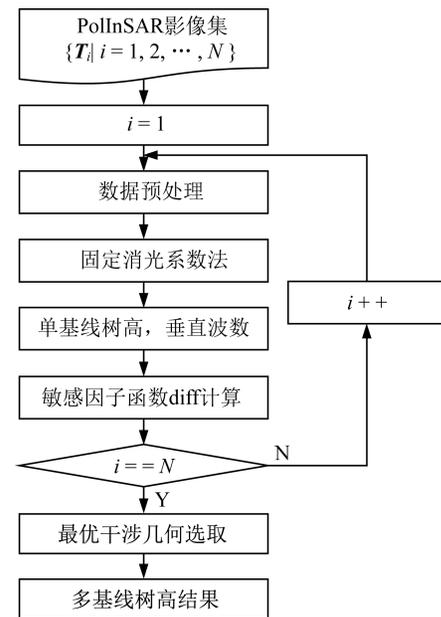


图2 本文算法流程

Fig.2 Flow chart of the algorithm used in this paper

2 真实数据实验

2.1 实验数据介绍与处理

为验证本文所提出算法的有效性,选择非洲加蓬境内的 Mabounie 地区作为实验区。该区域地貌以丘陵为主,地势平缓,主要植被类型为典型的非洲热带雨林,森林平均高度为 30 m 左右。实验数据采用 AfriSAR 2016 项目提供的 4 景 F-SAR 机载 P 波段全极化 SAR 影像,4 景影像的基本信息见表 1。AfriSAR 2016 项目是由欧洲航天局(European Space Agency, ESA)、德国宇航局(Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, DLR)与法国宇航局(Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales, ONERA)等机构共同开展的森林调查项目,旨在解决 BIOMASS 卫星任务的相关需求问题,尤其是地球物理产品算法的研发与验证。

表 1 PolSAR 影像参数表

Tab.1 Parameters of the PolSAR images

波段	极化方式	影像类别	影像编号	垂直基线/m	影像分辨率/m	入射角范围/(°)
P	全极化	主影像	0708	Master	1.2(距离向) 0.9(方位向)	25~60
			0703	30		
		从影像	0704	40		
			0706	10		

本实验研究区数据已由 DLR 进行了成像、配准、去平等预处理工作。首先将每个干涉对分别进行 4:2 多视;然后采用 BoxCar 滤波,滤波窗口为 9×9 ;最后进行相干性估计,得到每一干涉对的极化干涉相干矩阵 T 。

2016 年,ESA 和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)等机构获取了该实验区 20 m 分辨率的激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)数据。本文将 LiDAR 冠层高度模型(Canopy Height Model, CHM)产品作为树高定量比较数据,由于云雾的影响,LiDAR CHM 产品只覆盖了实验区的部分区域。主影像 0708 的 PauliRGB 彩色合成图和 LiDAR CHM 产品示意图,如图 3(a)和图 3(b)所示。

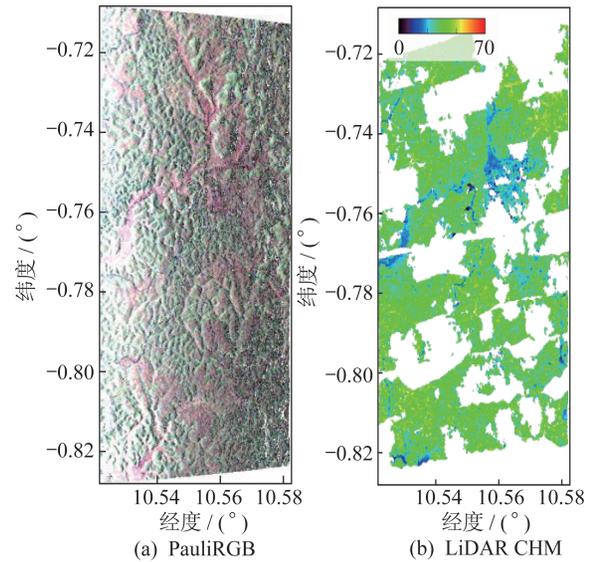


图 3 实验数据

Fig.3 Experimental data

为便于精度评定,首先将 PolInSAR 得到的植被高度结果与 LiDAR CHM 产品地理编码至 UTM 坐标系下,再进行精度对比评价。采用 51×51 的窗口均匀地在实验区内选取样地,求取采样窗口内植被高度的平均值,将 PolInSAR 结果与对应的 LiDAR 植被高度进行比较。样地取均值的统计对比策略可有效避免 2 种植被高度产品分辨率不同导致的配准误差的出现。

2.2 实验结果与分析

为验证本文所提算法的优越性,选择将基于去相干敏感因子的多基线植被高度反演算法与传统的基于相干性特性,以及基于测高精度的多基线植被高度反演算法的实验结果,进行统计比较和分析。

3 种算法各自的 PolInSAR 植被高度反演结果如图 4 所示。由图 4 可知,基于相干性特性的多基线算法与基于测高精度的多基线算法在实验区的东北部、西南部等区域均出现明显的高估现象(图 4 中虚线圆圈区域)。通过去相干敏感因子对传统多基线质量评价指标中纯体去相干本身对垂直波数的敏感性进行修正,选取了最优的干涉几何,有效抑制了反演高估的问题。此外,还通过计算各算法植被高度反演结果与 LiDAR CHM 之间的均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)以及相对误差 δ ,对各算法的反演结果精度进行定量分析,精度评价结果如图 5 所示。

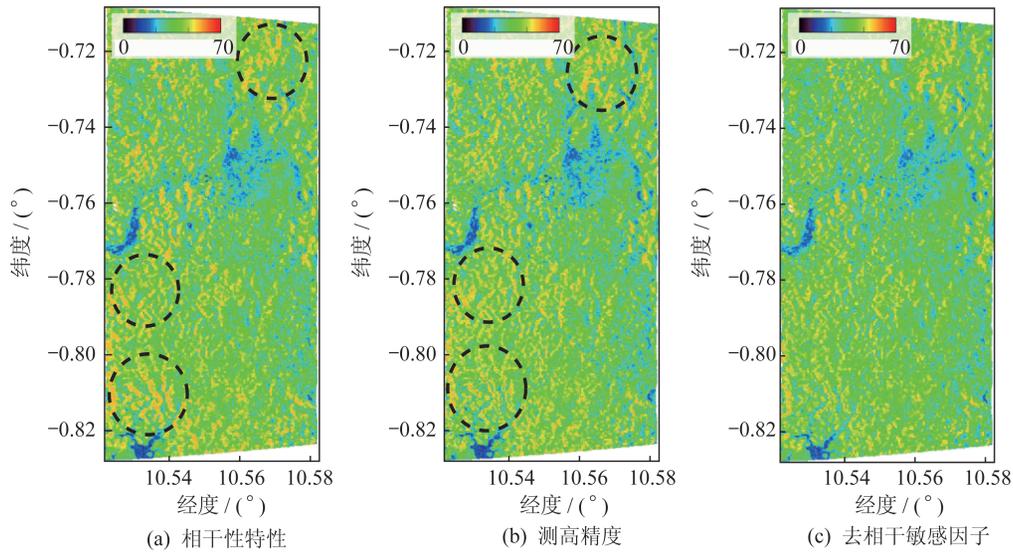


图 4 多基线 PolInSAR 植被高度反演结果图

Fig.4 Results of vegetation height inversion obtained by multi-baseline PolInSAR

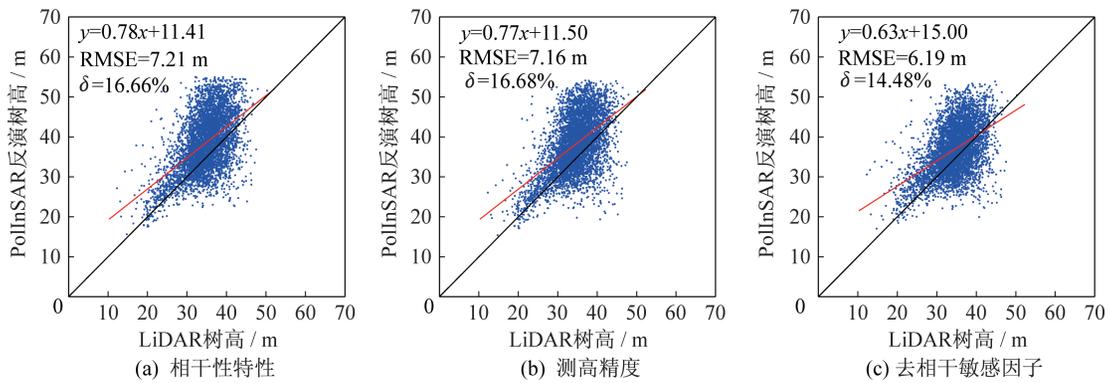


图 5 多基线 PolInSAR 植被高度反演精度评价结果图

Fig.5 Validation results of vegetation height inversion obtained by multi-baseline PolInSAR

RMSE 与 δ 的计算公式为

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h_i^{\text{LiDAR}} - h_i^{\text{PolInSAR}})^2}{N}} \quad (6)$$

$$\delta = \left(\sum_{i=1}^N \frac{|h_i^{\text{LiDAR}} - h_i^{\text{PolInSAR}}|}{h_i^{\text{LiDAR}}} \right) / N \quad (7)$$

由植被高度反演精度评价结果可知,基于相干性特性的多基线反演算法、基于测高精度的多基线反演算法,以及基于去相干敏感因子的多基线反演算法的均方根误差分别为 7.21、7.16、6.19 m,相对误差分别为 16.66%、16.68%、14.48%。与基于相干性特性的多基线反演算法相比,本文所提算法的精度提高为 14.14%,与基于测高精度的多基线反演算法相比,本文所提算法的精度提高为 13.55%。实验结果表明,本文提出的基于去相干敏感因子的多

基线反演算法结果最优,精度提升明显,证明该算法具有可行性与有效性。传统多基线算法的质量评价指标忽略了纯体去相干本身对垂直波数的敏感性,很难筛选干涉几何匹配程度最优的垂直波数-植被高度组合,从而造成了大量反演高估现象。而基于去相干敏感因子的多基线反演算法通过去相干敏感因子对纯体去相干本身对垂直波数的敏感性进行修正,选取了最优的干涉几何,从多个单基线反演植被高度中确定最佳树高反演结果。综上所述,本文为 P 波段多基线 PolInSAR 植被高度反演提供了一种新的、可靠性更高的质量评价指标和反演策略。另外,本文提出的反演方法仍依赖于单基线反演结果,未充分利用多基线观测信息,这也是进一步研究需要改进之处。

3 结束语

本文针对多基线 PolInSAR 植被高度反演中传统质量评价指标存在的问题,在研究垂直波数对树高反演影响的基础上,将去相干敏感因子作为一个新的质量评价指标用于最优干涉几何选取,提出基于去相干敏感因子的多基线 PolInSAR 植被高度反演方法,并使用 AfriSAR 2016 项目中 Mabounie 地区的 4 景 P 波段全极化 SAR 数据与传统多基线算法进行真实数据对比实验。实验结果表明,传统多基线算法植被高度反演结果存在明显的高估,以去相干敏感因子作为质量评价指标,植被高度反演的 RMSE 为 6.19 m,较其他两种传统多基线反演算法的精度提升可达 14.14% 和 13.55%,有效地提高了 P 波段多基线 PolInSAR 反演的结果精度和可靠性。

参考文献

- [1] 付海强. 基于测量平差理论的 PolInSAR 植被垂直结构提取模型与方法[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [2] 韩子硕, 王春平. 合成孔径雷达目标检测算法研究进展[J]. 飞航导弹, 2020(7): 33-39.
- [3] TREUHAFT R N, MADSEN S N, MOGHADDAM M M, et al. Vegetation characteristics and underlying topography from interferometric radar [J]. *Radio Science*, 1996, 31(6): 1449-1486.
- [4] TREUHAFT R N, SIQUEIRA P R. Vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar [J]. *Radio Science*, 2000, 35(1): 141-177.
- [5] PAPATHANASSIOU K P, CLOUDE S R. Single-baseline polarimetric SAR Interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(11): 2352-2363.
- [6] CLOUDE S R, PAPATHANASSIOU K P. Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry [J]. *IEEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(3): 125-134.
- [7] DUBOIS-FERNANDEZ P C, SOUYRIS J C, ANGELLIAUME S, et al. The compact polarimetry alternative for spaceborne SAR at low frequency [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3208-3222.
- [8] GARESTIER F, DUBOIS-FERNANDEZ P C, CHAMPION I. Forest height inversion using high-resolution P-band PolInSAR data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(11): 3544-3559.
- [9] 朱建军, 解清华, 左廷英, 等. 复数域最小二乘平差及其在 PolInSAR 植被高反演中的应用[J]. *测绘学报*, 2014, 43(1): 45-51.
- [10] 付海强, 朱建军, 汪长城, 等. 极化干涉 SAR 植被高反演复数最小二乘平差法[J]. *测绘学报*, 2014, 43(10): 1061-1067.
- [11] KUGLER F, LEE S K, HAJNSEK I, et al. Forest height estimation by means of PolInSAR data inversion: the role of the vertical wavenumber [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(10): 5294-5311.
- [12] LEE S K, KUGLER F, PAPATHANASSIOU K, et al. Multi-baseline polarimetric SAR interferometry forest height inversion approaches [C]// *ESA PolInSAR Workshop*. Frascati, Italy: DLR, 2011: 1473-1477.
- [13] DENBINA M, SIMARD M, HAWKINS B. Forest height estimation using multi-baseline PolInSAR and sparse LiDAR data fusion [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(10): 3415-3433.
- [14] 沈鹏, 汪长城, 朱建军, 等. 融合升降轨的极化干涉 SAR 三层模型植被高度反演方法[J]. *测绘学报*, 2017, 46(11): 1868-1879.
- [15] CLOUDE S R. *Polarisation: applications in remote sensing* [M]. London: Oxford University. Press, 2010.
- [16] FLYNN T, TABB M, CARANDE R. Coherence region shape extraction for vegetation parameter estimation in polarimetric SAR interferometry [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2002(5): 2596-2598.
- [17] 付海强. 顾及趋势性误差改正及观测信息增强的 InSAR/PolInSAR 林下地形及森林高度反演方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2018.
- [18] LEE S K, FATOYINBO T E, LAGOMASINO D, et al. Multi-baseline TanDEM-X mangrove height estimation: the selection of the vertical wavenumber [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(10): 3434-3442.