

# 基于地相位优化估计的 RVoG 三阶段森林冠层高度反演

罗洪斌 朱泊东 岳彩荣 杨文俊 龙 飞 徐婉婷  
(西南林业大学林学院, 昆明 650224)

**摘要:** 极化干涉合成孔径雷达 (PolInSAR) 估测森林结构参数中,数据受基线长度、信噪比、环境地形以及雷达波长的影响,尤其在复杂森林环境条件下,会导致观测到的复相干存在误差,从而影响最终的反演结果。为解决此问题,首先探讨了体相干选择对 RVoG 三阶段森林冠层高度反演的影响,以地相位为参考逐像素选择距离地相位最远的相干性作为体相干。其次改进了地相位估计方法,采用戴明回归 (DMR) 和正交回归 (OGR) 2 种相干直线拟合方法来改进地相位的估计,并在 DMR 拟合方法中设置了不同的误差比 (0.3 和 0.6) 来比较地相位估计方法对 RVoG 三阶段森林冠层高度反演的影响。研究结果表明:以地相位为参考逐像素选择体相干的反演结果相较于直接使用 HV 极化通道的复相干  $\gamma_{HV}$  为体相干的反演精度有明显提升,决定系数 ( $R^2$ ) 由 0.349 增加到 0.383,均方误差由  $7.097\text{ m}^2$  降低到  $5.755\text{ m}^2$ 。在体相干优化选择的基础上,采用了戴明回归和正交回归对地相位估计方法进行改进。表明基于最小二乘回归 (LSR) 地相位估计的 RVoG 三阶段反演精度最低,采用 DMR 和 OGR 进行相干线拟合的反演精度相较于 LSR 均有一定提升,所有反演结果的决定系数 ( $R^2$ ) 均在 0.440 左右,均方误差 (MSE) 均降低了  $2\text{ m}^2$  左右。研究结果说明采用 RVoG 三阶段方法反演森林冠层高度时,在复相干存在误差的情况下,用传统最小二乘回归 (LSR) 估计地相位进行高度反演会对结果带来一定误差,通过其他相干直线拟合方法来克服复相干误差的影响能改善最终的森林冠层高度反演结果,以地相位为参考选择体相干的反演方法也更为合理。

**关键词:** 森林冠层高度; 地相位估计; 体相干选择; RVoG 三阶段反演; PolInSAR

中图分类号: S771.8      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298 (2022)07-0301-07      OSID: 

## Forest Canopy Height Inversion in RVoG Three-stage Based on Optimal Estimation of Ground Phase

LUO Hongbin ZHU Bodong YUE Cairong YANG Wenjun LONG Fei XU Wanting  
(College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

**Abstract:** In polarimetric interferometric synthetic aperture ray (PolInSAR) forest structure parameter estimation, the data are affected by the baseline length size, signal-to-noise ratio, environmental topography, and radar wavelength, especially under complex forest environmental conditions, which can lead to errors in the observed complex coherence and thus affect the final inversion results. Firstly the effect of volume coherence selection on the RVoG three-stage forest canopy height inversion was explored, and the coherence farthest from the ground phase was selected as the volume coherence with the ground phase as the reference pixel by pixel. Secondly, the ground phase estimation method was improved by using two coherence linear fitting methods, Deming regression (DMR) and orthogonal regression (OGR), to improve the estimation of the ground phase, and different error ratios (0.3 and 0.6) were set in the DMR fitting method to compare the effects of the ground phase estimation method on the RVoG three-stage forest canopy height inversion. The results showed that the inversion accuracy of the inversion of volume coherence with ground phase as the reference pixel-by-pixel selection was improved compared with that of the complex coherence with the HV polarization channel directly. The coefficient of determination ( $R^2$ ) was increased from 0.349 to 0.383, and the mean square error (MSE) was decreased

from 7.097 m<sup>2</sup> to 5.755 m<sup>2</sup>. Based on the optimal selection of the volume coherence, the ground phase estimation method was improved by using Deming regression and orthogonal regression. It was shown that the least squares regression (LSR)-based ground phase estimation had the lowest accuracy of RVoG three-stage inversion, using DMR and OGR for coherence line fitting had a certain improvement in inversion accuracy compared with LSR, and the coefficient of determination ( $R^2$ ) of all inversion results was around 0.440, and all MSE was reduced by about 2 m<sup>2</sup>. The conclusions indicated that the forest canopy height inversion using the RVoG three-phase method introduced some errors in the height inversion by using the traditional LSR estimation of the ground phase in the presence of errors in the complex coherence. Using other coherence linear fitting methods to overcome the influence of the complex coherence error can improve the final forest canopy height inversion results, and it was also more reasonable to choose volume coherence inversion method with the ground phase as the reference.

**Key words:** forest canopy height; ground-phase estimation method; volume coherence selection; RvoG three-stage inversion; PolInSAR

0 引言

在全球气候变化的背景下,森林生态系统的监测显得尤为重要<sup>[1]</sup>。森林冠层高度是反映森林生物量、碳储量、森林健康状况的重要指标之一,在森林的演替和变化监测中也具有重要作用<sup>[2-4]</sup>。因此准确快速地获取森林高度信息对森林资源的动态监测具有重要意义,传统的人工调查效率低,成本高,虽可获得精确的结果,但在大区域尺度的调查中并不适用。遥感技术的应用,极大改善了这一被动局面<sup>[5]</sup>。

现阶段森林资源调查中使用的遥感技术方法主要包括光学、激光雷达、微波遥感等<sup>[6]</sup>。光学遥感的优势在于可用数据源多、时间序列长以及重访周期短,虽然能获取地表反射率信息,但对森林的垂直结构信息并不敏感,而且受云的影响较为严重<sup>[7]</sup>;激光雷达可全天候作业并快速获得林分冠层以及内部三维结构信息,但观测尺度有限且成本较高<sup>[8]</sup>;虽然星载平台的激光雷达如 ICESat-1、ICESat-2 和 GEDI 已开始广泛应用,改善了观测尺度问题,但由于传感器平台和数据量限制,目前也只做到条带覆盖而不是面覆盖,微波遥感具备全天候、主动性、大范围面覆盖的特点,相较于前两者优势极为显著<sup>[9]</sup>。

其中,极化干涉合成孔径雷达 (Polarimetric interferometric SAR, PolInSAR) 既具有干涉合成孔径雷达 (Interferometric SAR, InSAR) 对地表植被散射体的空间分布和高度很敏感的特性,同时又具有极化合成孔径雷达 (Polarimetric SAR, PolSAR) 对植被散射体的形状和方向很敏感的特性,所以在森林冠层高度的监测中得到了广泛应用<sup>[10-11]</sup>。但是基于 PolInSAR 的森林冠层高度反演需要考虑雷达波长、重访周期、空间基线和信噪比等因素。为此,德国宇航中心 (DLR) 发射了首个双星同步观测任务

TanDEM-X (TDX), 消除了时间去相关问题<sup>[12-14]</sup>。

在基于 PolInSAR 的森林冠层高度反演中应用最为广泛的是地面随机体 (Random volume on ground, RVoG) 相干散射模型和 RVoG 三阶段反演方法<sup>[15-17]</sup>,三阶段反演法通过干涉复相干的分布规律估计地表相位,利用查找表进行森林冠层高度反演,并已成功应用于不同的频段,包括 C-波段、L-波段、P-波段和 x-波段。在 RVoG 三阶段反演方法的理想条件下,不同极化通道的复相干在复平面内呈直线分布,采用最小二乘回归 (Least square regression, LSR) 求解直线与单位圆的交点,结合先验知识就可获得地表相位<sup>[17]</sup>,但在实际情况中却存在一定误差,PolInSAR 数据由于受基线、信噪比以及地形条件的影响,造成观测到的复相干存在误差,因此复相干的实部和虚部在复平面内的分布会偏离理想的相干线<sup>[18]</sup>,另外由于 TDX 的波长较短,穿透性较差,难以获得地表散射信息,得到的体散射和地表散射相位中心差别较小造成线性分布规律不明显<sup>[19-20]</sup>,而最小二乘法仅考虑自变量中的误差未考虑因变量的误差,以此求解的地表相位也存在误差<sup>[21]</sup>。另外,在体相干的选择时,以往的研究多采用固定极化通道作为体相干,若复相干存在误差时,所选择的体相干与地相位的差异并不是最大。

为此,CLOUDE 等<sup>[17]</sup>提出采用整体最小二乘法来改善对地相位的估计,在文献[18]的研究中也得到了验证,考虑了自变量与因变量的误差来改善直线拟合和地相位的求解可提高森林冠层高度反演精度,除此以外,戴明回归 (Deming regression, DMR) 和正交回归 (Orthogonal regression, OGR) 2 种直线拟合方法也考虑了自变量和因变量存在误差的情况,正交回归的基本原理是在样本中间找到一条直线,使得点到直线的距离之和最小,若在样本点的横纵坐标都包含误差的情况下,使用正交回归能够得到更准确的结果<sup>[22]</sup>,戴明回归则是正交回归的一般化,

在样本点的横纵坐标都有误差且误差大小不同时,在目标函数中加入一个误差比来限制直线拟合,此时优化的便是样本点与直线的斜距,当误差比为 1 时,戴明回归也就是正交回归<sup>[23]</sup>,但是将此方法结合 RVoG 三阶段反演方法估计地相位进行森林冠层高度反演的研究报道较少。因此,为进一步探索 RVoG 三阶段森林冠层高度反演中地相位估计所采用的直线拟合方法以及体相干的选择对反演结果的影响,本文将采用正交回归和戴明回归 2 种直线拟合方法与传统最小二乘回归进行地相位估计,并以地相位为参考逐像素选择体相干来反演森林冠层高度。

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区概况

思茅区地处云南省普洱市(100°19′29″~100°26′57″E,22°27′7″~23°5′29″N),东接江城县,西接澜沧县,南邻西双版纳州,北接宁洱县,地势西北高东南低,区域内山脉、峡谷、水系众多,平均海拔为 2 155 m,气候类型属于南亚热带季风气候,干湿季节不分明,常年高温、湿润、多雨,年平均气温为 17.8℃,平均降水量为 1 524 mm,在特殊气候类型的作用下,境内森林覆盖率较高,样地分布位置见图 1。

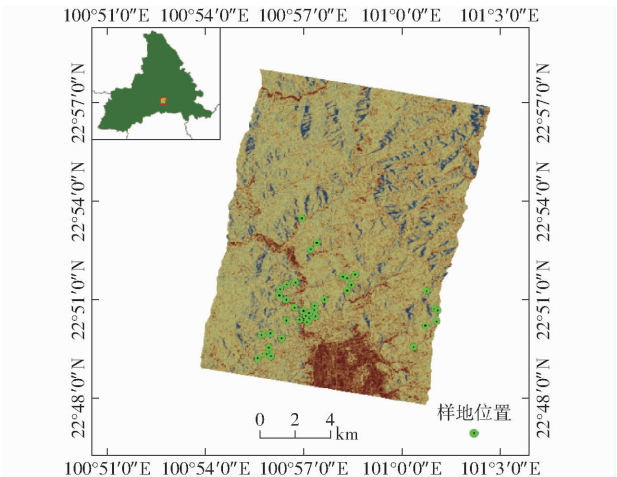


图 1 研究区样地位置示意图

Fig.1 Geographic location of study area sample

### 1.2 样地数据

样地数据的获取时间为 2017 年 3 月,在研究区内设置了 42 个样地,优势树种为思茅松,其中成熟林和中龄林居多,幼龄林和过熟林最少,样地冠层高度主要采用刻度杆、激光测距仪、微波测距仪相结合进行获取,首先通过 GPS 确定样本点中心,设置半径为 10 m 的圆形样地;随后绕测、记录胸径,计算样圆内样本木的平均胸径以及所属径阶,选择属于该径阶的 3~4 棵标准木,使用刻度杆测量其冠层高

度,对于森林冠层高度超过刻度杆有效值的情况,采用激光测距仪、微波测距仪相结合进行测量。样地森林冠层高度最小值为 8.210 m,最大值为 20.230 m,平均值为 16.108 m。

### 1.3 TanDEM-X 数据的获取与处理

TanDEM-X 数据获取时间为 2015 年 10 月 6 日,该数据由德国宇航中心 DLR 提供,获取模式为 Bistatic 模式,数据格式为 CoSSC 全极化单视复数,中心入射角为 39.640°,有效基线为 361.310 m,模糊高度为 17.700 m。对数据进行了平地相位去除、多视、滤波等处理,并计算不同极化基下的复相干,包含线极化基下的干涉复相干( $\gamma_{HH}$ 、 $\gamma_{HHmVV}$ 、 $\gamma_{HHpVV}$ 、 $\gamma_{HHVV}$ 、 $\gamma_{HV}$ 、 $\gamma_{HVPVH}$ 、 $\gamma_{VV}$ )、圆极化基下的干涉复相干( $\gamma_{LL}$ 、 $\gamma_{LR}$ 、 $\gamma_{RR}$ )、SVD 相干优化下的干涉复相干( $\gamma_{Opt1}$ 、 $\gamma_{Opt2}$ 、 $\gamma_{Opt3}$ )以及 PD 相干优化的干涉复相干( $\gamma_{PDhigh}$ 、 $\gamma_{PDlow}$ )<sup>[24-25]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 RVoG 相干散射模型

RVoG 模型是一种应用广泛的两层相干散射模型,能够基于 PolInSAR 复相干反演森林冠层高度<sup>[26-28]</sup>,TanDEM-X 为双基站工作模式,在不考虑时间去相干等因素时,干涉复相干可表示为

$$\gamma(\omega) = e^{j\varphi_0} \frac{\gamma_v + m(\omega)}{1 + m(\omega)} = e^{j\varphi_0} [\gamma_v + L(\omega)(1 - \gamma_v)] \quad (1)$$

其中  $L(\omega) = \frac{m(\omega)}{1 + m(\omega)}$

式中  $m(\omega)$ ——有效地体幅度比

$\varphi_0$ ——地相位,当  $m(\omega) = \infty$  时为地表散射,  
当  $m(\omega) = 0$  时为体散射

$\gamma_v$ ——仅由植被引起的失相干

不考虑地表散射的贡献时  $\gamma_v$  可表示为

$$\gamma_v = \frac{\int_0^{h_v} f(z) e^{ik_z z} dz}{\int_0^{h_v} f(z) dz} = \frac{\frac{2\sigma}{\cos(\frac{2\sigma}{e^{\frac{2\sigma}{\cos\theta}} - 1})} \int_0^{h_v} e^{ik_z z} e^{\frac{2\sigma z}{\cos\theta}} dz}{\frac{p}{p_1} \frac{e^{p_1 h_v} - 1}{e^{p h_v} - 1}} \quad (2)$$

其中

$$p = \frac{2\sigma \cos\alpha}{\cos(\theta - \alpha)}$$

$$p_1 = p + jk_z$$

$$k_z = \frac{2n\pi B_{\perp}}{\lambda R \sin(\theta - \alpha)}$$

式中  $\sigma$ ——植被平均消光系数

$h_v$ ——植被高度

$\theta$ ——主影像入射角

$z$ ——散射层位置  
 $f(z)$ ——植体散射部分的相对反射率  
 $\alpha$ ——距离向坡度  
 $k_z$ ——垂直有效波数,表示相位对高度变化的敏感性  
 $R$ ——斜距      $B_{\perp}$ ——垂直基线长度

$n$  取决于雷达图像的获取模式<sup>[29]</sup>,单基工作模式时  $n=2$ ;双基工作模式时  $n=1$ 。

2.2 RVoG 三阶段反演流程

三阶段森林冠层高度反演方法由 CLOUDE 等<sup>[17]</sup>提出,该方法基于复相干的空间分布特征进行地相位的求解,并基于 RVoG 模型进行森林冠层高度反演,过程分为 3 个阶段:

(1)拟合相干直线。根据主辅影像的散射矩阵得到极化干涉矩阵,对不同极化状态下的复相干和最优相干的实部和虚部进行相干直线拟合。

(2)从相干直线与单位圆的 2 个交点中求解地相位,基于极化通道的物理散射机制认为 HV 通道只有植被层的体散射, $\gamma_{HV}$ 地体幅度比较小,可以通过 2 个相干点与  $\gamma_{HV}$  的距离来判断地相位,距离  $\gamma_{HV}$  最远的那一个即为地相位  $\varphi_0$ 。

$$\varphi_0 = \begin{cases} \arg(\gamma_0) & (|\gamma_{HV} - \gamma_0| > |\gamma_{HV} - \gamma_1|) \\ \arg(\gamma_1) & (|\gamma_{HV} - \gamma_0| < |\gamma_{HV} - \gamma_1|) \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\gamma_0, \gamma_1$ ——相干线与单位圆的 2 个交点  
 $\arg()$ ——取相位函数

(3)森林冠层高度( $h_v$ )和消光系数( $\sigma$ )的估计。根据式(2)中  $\gamma_v$  与  $h_v, \sigma$  的关系设置合理的  $h_v$  和  $\sigma$ ,创建二维查找表(LUT),反演过程就是在查找表中搜索与体相干( $\gamma(\text{vol})$ )距离最小的模型体相干( $e^{j\varphi_0}\gamma_v$ )所对应的森林冠层高度( $h_v$ )和消光系数( $\sigma$ )

$$\min_{h_v, \sigma} L = \left\| \gamma(\text{vol}) - e^{j\varphi_0} \frac{p}{p_1} \frac{e^{p_1 h_v} - 1}{e^{p h_v} - 1} \right\| \quad (4)$$

2.3 地相位求解的相干直线拟合方法改进

传统的三阶段反演采用最小二乘回归(LSR)来拟合相干直线求解地相位,文中采用 3 种直线拟合方法进行地相位求解,分别为最小二乘回归(LSR)、戴明回归(DMR)和正交回归(OGR)。

在  $n$  个样本点:  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  中,目标函数为  $y = ax + b$ 。最小二乘的原理是在样本点中寻找一条直线,计算  $y$  的误差与残差,使拟合函数的拟合误差(残差和)达到最小来构建直线方程,此过程仅考虑了自变量  $x$  的误差,目标函数优化的是样本点到直线的竖直距离<sup>[30]</sup>。

正交回归则是在样本中间找到一条直线,使得  $n$  个样本点到直线的距离之和最小,此方法考虑了自变量  $x$  和因变量  $y$  都包含误差情况,相较于最小

二乘回归增加了因变量误差的权重<sup>[23]</sup>。

戴明回归则是正交回归的一般化,若自变量  $x$  和因变量  $y$  均有误差且误差不同时,可在目标函数的构建中加入一个误差比(0~1)来限制直线拟合,此时优化的便是样本点与直线的斜距,误差比为 1 时,戴明回归也就是正交回归<sup>[22]</sup>。

2.4 体相干优化选择

基于极化通道的物理散射机制认为 HV 通道只有植被层的体散射, $\gamma_{HV}$ 地体幅度比较小,通常以  $\gamma_{HV}$  作为体相干进行森林冠层高度反演,但是在体相干的选择中由于 HV 极化通道的散射相位中心并不是最靠近冠层顶部的,因此本文基于逐像素单元选择距离  $\varphi_0$  最远的复相干作为体相干,以  $\varphi_0$  为参考得到的体相干散射相位中心更接近冠层顶部,从而避免使用固定极化通道作为体相干造成反演结果存在误差。

$$d = \max_{\gamma_i} \text{abs}([\gamma_1 \quad \gamma_2 \quad \dots \quad \gamma_i]^T - [e^{j\varphi_0}]) \quad (5)$$

式中  $\gamma_i$ ——各极化基和极化通道复相干  
 $\gamma_{\max}$ ——距离地相位最远的体相干  
 $\text{abs}()$ ——取模值

2.5 精度评价指标

采用决定系数  $R^2$ 、均方误差(MSE)对反演精度进行评价。

3 结果分析

本文基于逐像素进行体相干选择并采用 3 种直线拟合方法来进行相干直线的拟合求解地相位来反演森林冠层高度,探讨地相位估计方法和体相干的选择对森林冠层高度反演的影响。其中,在地相位拟合方法中戴明回归需加入一个自变量与因变量的误差比来限制直线拟合,当误差比为 1 时戴明回归也就是正交回归。为了对结果进行对比,分别采用误差比 0.3 和 0.6 来构建戴明回归目标函数,并基于 3 种不同方法估计的地相位结合 RVoG 三阶段方法进行森林冠层高度反演,不同反演策略的验证结果如图 2 所示。

由图 2 可知,在 5 种不同地相位估计方法的森林冠层高度反演中,采用 LSR 拟合相干线求解地相位并直接基于 HV 极化通道相干性  $\gamma_{HV}$  的反演精度最低,  $R^2$  为 0.349, MSE 为 7.097 m<sup>2</sup>;以地相位为参考,采用基于像元的最大距离体相干选择相较于使用  $\gamma_{HV}$  为体相干的反演精度有明显提升,  $R^2$  由 0.349 增加到 0.383, MSE 由 7.097 m<sup>2</sup> 降低到 5.755 m<sup>2</sup>,表明以地相位为参考选择体相干能有效提高森林冠层高度反演精度,散点图 2b 相较于图 2a 也较为收敛。

在不同的相干直线拟合方法反演的结果中,无

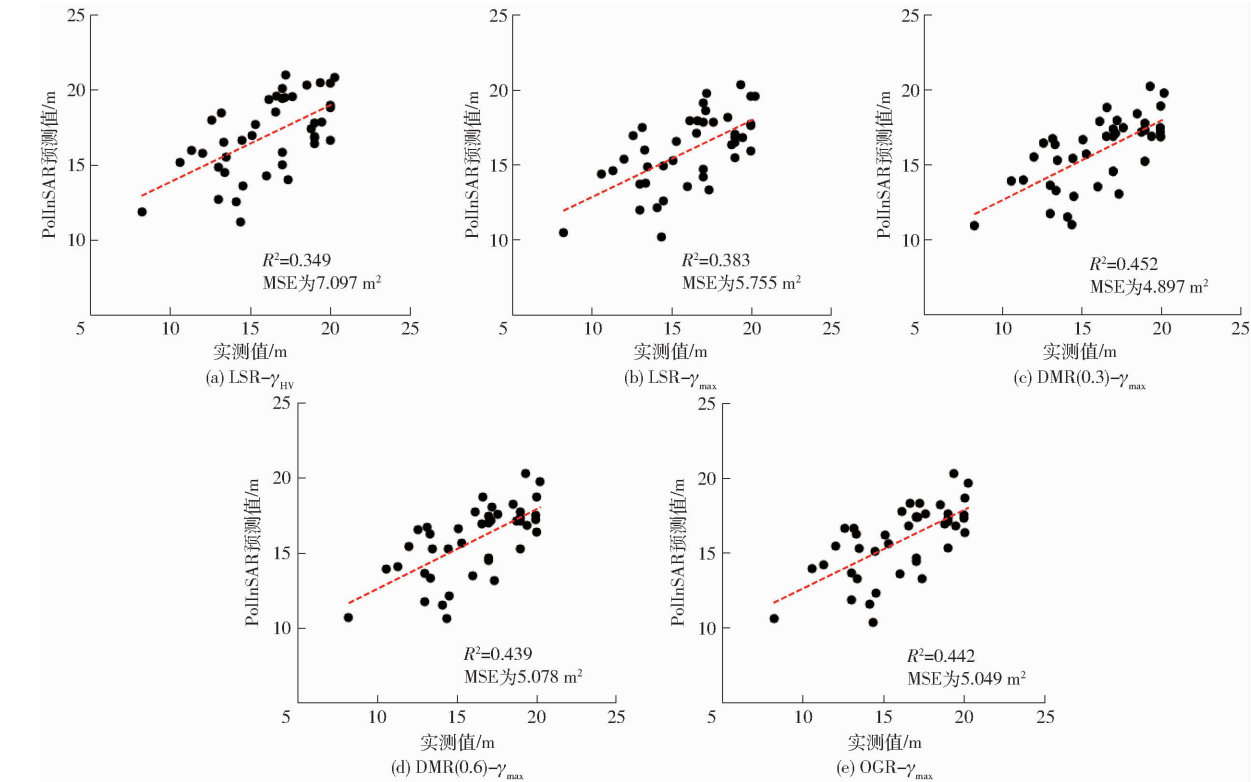


图 2 不同方法的反演结果对比

Fig. 2 Comparison of inversion results of different methods

论采用 DMR 进行相干线拟合还是采用 OGR 进行相干线拟合,求解地相位的反演精度相较于 LSR 也有一定提升, $R^2$ 均提高了 15.927% 左右,MSE 约减少  $2\text{ m}^2$ ,其中采用 DMR 拟合相干直线且误差比为 0.3 时的精度最高,MSE 为  $4.897\text{ m}^2$ ,但是三者之间的差异并不明显,但结果充分说明了在 RVoG 三阶段森林冠层高度反演中地相位估计方法对最终的反演结果有一定影响。从散点图中也能看出明显的变化,在 LSR 地相位估计反演验证结果中(图 2a、2b),样本点在趋势线周围的分布较为离散,其余 3 种地相位估计的反演验证结果中样本点的分布更靠近趋势线(图 2c ~ 2e)。

前文提到,RVoG 三阶段反演的理想条件下,不同极化通道的复相干在复平面内呈直线分布,采用最小二乘法(LS)可求解地表相位。但在实际情况下却存在一定的误差,本文也做了验证(图 3),受基线长度、信噪比以及地形条件的影响,干涉复相干本身存在误差,在复平面内的分布会偏离理想的相干线,另外 TDX 的波长较短,穿透性差的局限性造成体散射和地表散射相位中心差别较小,这也会使复相干的分布偏离相干线,此时采用 LSR 进行相干直线拟合会使拟合直线偏离总体趋势,因此求解的地表相位也存在误差;DMR 和 OGR 2 种回归方法均考虑了自变量和因变量的误差,在误差比的约束下,即便数据存在噪声点,但拟合得到直线仍然服从样

本的总体变化规律。另外由于复相干存在误差,体相干的选择时采用固定极化通道作为体相干也并不合理,在后续讨论中将对此问题进行进一步分析。

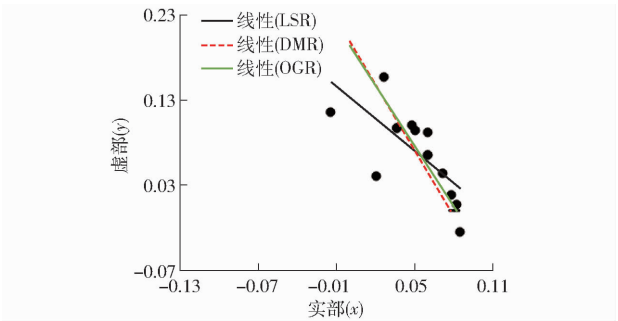


图 3 不同直线拟合方法结果

Fig. 3 Results of different straight line fitting methods

4 讨论

本文对三阶段反演算法中的地相位估计方法进行了比较优化,说明在复相干存在误差的情况下,对地相位估计方法进行优化能改善森林冠层高度的反演结果,结合研究区和数据情况来看,本文的研究区位于云南省普洱市思茅区,该区域地处南亚热带季风气候区,林下植被情况复杂且地形起伏也较大,平均坡度为  $23^\circ$ 、最大高差为  $1\,036\text{ m}$ (来源于 DEM)。在此条件下,由于 SAR 数据的成像机制限制,地形起伏较大带来的直接影响就是数据的叠掩和透视收

缩现象,使数据出现无效区域和引起失相干,这对于森林冠层高度的反演有直接的影响<sup>[31]</sup>。

另一方面是研究所使用的 TDX 数据的波长较短,对森林结构的穿透性有限,虽能获得有效冠层散射相位中心,但是难以获取地表散射信息,相干优化算法也难以有效进行相位分离,各复相干的相位中心差别较小,且本研究使用的数据空间基线相对较大带来基线失相干,以上的因素都会给复相干带来误差,此时用最小二乘法拟合相干直线估计的地相位误差也相对较大<sup>[18-20,32]</sup>,固定极化通道的体相干与地相位的距离也并不是最远,而文中引入戴明回归和正交回归来改善地相位的估计能在一定程度上克服复相干噪声点的影响从而使估计的地相位更加准确,从而提高森林冠层高度反演效果,此结论与文献[18]的研究一致。本文的研究结果可为地相位估计方法的优化选择提供一种参考。对于体相干的选择优化,在确定地相位之后,以地相位为参考选择距离大的相干性作为体相干相较于采用固定极化通道更为合理。

但从总体反演结果来看,地相位估计的优化和体相干的优化选择能改善反演精度,但总体的反演精度略低于相关研究的反演结果<sup>[16,33]</sup>,一方面是受到上述所提到的环境、地形以及卫星平台和数据自身存在的问题,另一方面是所使用的验证样本数据带来的影响,在人工测量时,若森林冠层高度分布不

均匀,最终所得到的测量结果与反演结果也存在一定差异,其次是结果验证中使用的数据样本量有限,在今后的研究中,可以采用 LiDAR、GEDI、ICESat 的冠层高度产品来进行验证,在大样本数据的支撑下,结果可能更据说服力。

虽然 TDX 数据与样地数据的测量时间相差 1 年,在 1 年中森林冠层高度会发生变化,但研究对象多为成熟林和过熟林,高度变化相对缓慢,因此 1 年间植被的高度变化并不会太大,采用样地测量数据来对反演结果进行验证是有效的。

5 结束语

在 RVoG 三阶段森林冠层高度反演算法中,PolInSAR 数据受传感器自身和环境条件的影响,干涉复相干存在误差,此时采用最小二乘拟合相干直线来求解地相位的误差相对较大,本研究采用了戴明回归和正交回归方法来优化 RVoG 三阶段反演算法中地相位估计,并以地相位为参考来选择体相干。结果表明,在复相干存在误差的情况下,以地相位为参考选择体相干的反演结果比基于固定极化通道的反演结果要好。另外,戴明回归和正交回归拟合的相干线求解地相位的反演结果也比采用最小二乘方法拟合相干直线的反演结果要好,因此对 RVoG 三阶段反演算法中的地相位估计和体相干的优化选择可改善森林冠层高度的反演结果。

参 考 文 献

[1] HALL F G, BERGEN K, BLAIR J B, et al. Characterizing 3D vegetation structure from space: mission requirements[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(11):2753-2775.

[2] GOETZ S, DUBAYAH R. Advances in remote sensing technology and implications for measuring and monitoring forest carbon stocks and change[J]. Carbon Management, 2011, 2(3):231-244.

[3] HUANG W L, SUN G Q, DUBAYAH R, et al. Mapping forest above-ground biomass and its changes from lvis waveform data [C]//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012:6561-6564.

[4] BISPO P, PARDINI M, PAPATHANASSIOU K P, et al. Mapping forest successional stages in the Brazilian Amazon using forest heights derived from Tandem-X SAR interferometry[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 232:111194.

[5] CHIRICI G, CHIESI M, CORONA P, et al. Estimating daily forest carbon fluxes using a combination of ground and remotely sensed data[J]. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences, 2016,121(2):266-279.

[6] XU M, XIANG H, YUN H, et al. Retrieval of forest canopy height jointly using airborne lidar and alos palsar data[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2019, 14(2): 022203.

[7] CAO C X, BAO Y F, CHEN W, et al. Extraction of forest structural parameters based on the intensity information of high-density airborne light detection and ranging[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2012,6(1): 063533.

[8] ZHANG L, DUAN B, ZOU B. Research on inversion models for forest height estimation using polarimetric sar interferometry [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2017, 2(W7): 659-663.

[9] SILVA C A, DUNCANSON L, HANCOCK S, et al. Fusing simulated GEDI, ICESAT-2 and NISAR data for regional aboveground biomass mapping[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 253:112234.

[10] GRAHAM L C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping[J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(6): 763-768.

[11] GARESTIER F, LE Toan T. Forest modeling for height inversion using single-baseline InSAR/Pol-InSAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2010,48(3):1528-1539.

[12] LAVALLE M, HENSLEY S. Extraction of structural and dynamic properties of forests from polarimetric-interferometric SAR data affected by temporal decorrelation[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2015, 53(9):4752-4767.

[13] PERSSON H, OLSSON H, SOJA M, et al. Experiences from large-scale forest mapping of sweden using Tandem-X data[J].

- Remote Sensing, 2017, 9(12):1253.
- [14] KUMAR S, GARG R D, KUSHWAHA S, et al. Bistatic PolInSAR inversion modelling for plant height retrieval in a tropical forest[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences, 2017,87(4): 817 – 826.
- [15] TREUHAFT R N, MADSEN S N, MOGHADDAM M, et al. Vegetation characteristics and underlying topography from interferometric radar[J]. Radio Science, 1996, 31(6):1449 – 1485.
- [16] LIAO Z M, HE B B, VAN DIJK A I J M, et al. The impacts of spatial baseline on forest canopy height model and digital terrain model retrieval using P-band PolInSAR data[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 210(8):403 – 421.
- [17] 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.
- [18] 许丽颖,李世强,邓云凯,等. 基于极化干涉 SAR 反演植被高度的改进三阶段算法[J]. 雷达学报,2014,3(1):28 – 34.  
XU Liying, LI Shiqiang, DENG Yunkai, et al. Improved three-stage algorithm of forest height retrieval with PolInSAR[J]. Journal of Radars,2014,3(1):28 – 34. (in Chinese)
- [19] PHAM M N. Research forest height estimation from polarimetric sar interferometry images[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [20] KUGLER F, SCHULZE D, HAJNSEK I, et al. TanDEM – X Pol – InSAR performance for forest height estimation[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2014, 52(10):6404 – 6422.
- [21] 孔建,姚宜斌,吴寒. 整体最小二乘的迭代解法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2010,35(6):711 – 714.  
KONG Jian,YAO Yibin,WU Han. Iterative method for total least-squares[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2010,35(6):711 – 714. (in Chinese)
- [22] 欧阳光. 正交回归最小二乘估计[J]. 湘南学院学报,2021,42(2):1 – 5.  
OUYANG Guang. The orthogonal regression least squares estimation[J]. Journal of Xiangnan University,2021,42(2):1 – 5. (in Chinese)
- [23] 张卉. 两变量都有误差时直线回归方程求取方法新探[J]. 计量技术,1996(6):36 – 37,6.  
ZHANG Hui. A new method for finding linear regression equations when both variables have errors[J]. Measurement Technique,1996(6):36 – 37,6. (in Chinese)
- [24] CLOUDE S R, PAPATHANASSIOU K P. Polarimetric SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1998, 36(5):1551 – 1565.
- [25] TABB M, ORREY J, FLYNN T, et al. Phase diversity: a decomposition for vegetation parameter estimation using polarimetric sar interferometry[C]//Proc EUSAR, Cologne, Germany,2002.
- [26] TREUHAFT R N, MADSEN S N, MOGHADDAM M, et al. Vegetation characteristics and underlying topography from interferometric radar[J]. Radio Science, 1996, 31(6):1449 – 1485.
- [27] HAJNSEK I, KUGLER F, LEE S K, et al. Tropical-forest-parameter estimation by means of Pol – InSAR: the INDREX – II campaign[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2009, 47(2):481 – 493.
- [28] PAPATHANASSIOU K, CLOUDE S R. Single-baseline polarimetric SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2001, 39(11):2352 – 2363.
- [29] KUGLEK F, LEE S K, HAJNSEK I, et al. Forest height estimation by means of pol-insar data inversion: the role of the vertical wavenumber[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2015,53(10): 5294 – 5311.
- [30] 姜伟,付佳媛. 最小二乘法及其应用[J]. 中国传媒大学学报(自然科学版),2020,27(5):72 – 78.  
JAIING Wei, FU Jiayuan. The least square method and its application[J]. Journal of Communication University of China (Science and Technology),2020,27(5):72 – 78. (in Chinese)
- [31] 任云. InSAR 叠掩与阴影检测技术[D]. 长沙:国防科学技术大学,2013.  
REN Yun. Research on layover and shadow detection technology in InSAR[D]. Changsha: National University of Defense Technology,2013. (in Chinese)
- [32] 张王菲,陈尔学,李增元,等. 干涉、极化干涉 SAR 技术森林高度估测算法研究进展[J]. 遥感技术与应用,2017,32(6): 983 – 997.  
ZHANG Wangfei, CHEN Erxue, LI Zengyuan, et al. Development of forest height estimation using InSAR/PolInSAR techniques[J]. Remote Sensing Technology and Applications,2017,32(6):983 – 997. (in Chinese)
- [33] QI W, LEE S K, HANCOCK S, et al. Improved forest height estimation by fusion of simulated GEDI LiDAR data and Tandem-X InSAR data[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 221:621 – 634.
- [34] 李增元,陈尔学. 合成孔径雷达森林参数反演技术与方法[M]. 北京:科学出版社,2018:103 – 125.
- [35] 张建双,范文义,毛学刚,等. 单基线 PolInSAR 森林高度反演方法研究[J]. 农业机械学报,2018,49(10):220 – 229.  
ZHANG Jianshuang, FAN Wenyi, MAO Xuegang, et al. Comparison of five methods to inverse forest height from single-baseline PolInSAR data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(10):220 – 229. (in Chinese)
- [36] 李俐,陈琦琦,张超,等. 基于 RNMU 的多源星载 SAR 影像融合与土地覆盖分类[J]. 农业机械学报,2020,51(3):191 – 200.  
LI Li, CHEN Qiqi, ZHANG Chao, et al. Multi-source spaceborne SAR image fusion based on RNMU and land cover classification[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(3):191 – 200. (in Chinese)