

PolInSAR 森林高度反演中方法及波段选择引起的不确定性分析

张庭苇^{1,2}, 姬永杰³, 张王菲¹

1. 西南林业大学 林学院, 昆明 650224;

2. 长沙市规划信息服务中心, 长沙 410004;

3. 西南林业大学 地理与生态旅游学院, 昆明 650224

摘要: 森林高度是反映森林资源数量和质量的重要参数, 极化干涉合成孔径雷达 PolInSAR (Polarimetric Synthetic Aperture Radar Interferometry) 技术在森林高度反演中极具潜力。由于森林散射特征受波长影响明显, 由此引起的散射机理差异使得基于 PolInSAR 技术反演的森林高度结果具有很大的不确定性。为了量化该不确定性的影响, 本文以模拟森林场景为例, 对 PolInSAR 技术森林高度反演中常用的 4 种方法——极化相位中心高度估测法、复相干相位中心差分法、复相干幅度反演法以及相干幅度、相位联合反演法, 以及它们在常用的 4 个微波波段 P、L、C 和 X 中的森林高度估测结果进行了分析; 明确了匀质森林场景中, 算法、波段选择引起的森林高度估测结果的不确定性。研究表明: 在森林场景基本一致的情况下, 估测算法的选择直接影响森林高度估测结果, 其中复相干幅度反演法在 4 个波段的估测结果中精度均最高, 但各估测点的估测结果离散度及不确定度较大。波长对 4 类估测方法估测结果的影响差异明显: 复相干幅度反演法的反演结果几乎不受波长的影响, 而相干幅度、相位联合反演法受波长影响明显, 在 P 和 L 波段反演结果中精度较高, 在 C 和 X 波段反演结果中精度降低明显。此外, 以传统的交叉极化 (HV) 相位代表冠层散射相位中心, 水平同极化与垂直同极化的相位差 (HH-VV) 代表地表散射相位中心, 采用复相干相位中心差分法进行森林高度估测会出现严重低估现象。估测结果不确定度具有波长和算法选择依赖性, 在 C 和 X 波段采用复相干相位中心差分法估测结果不确定度最低, 在 P 和 L 波段采用极化相位中心高度估测法估测结果不确定度最低, 而复相干幅度反演法估测结果则在多个波段中的不确定度均最高。

关键词: PolInSAR, 森林高度, 不确定性, 反演, 模拟森林场景

引用格式: 张庭苇, 姬永杰, 张王菲. 2022. PolInSAR 森林高度反演中方法及波段选择引起的不确定性分析. 遥感学报, 26(10): 1963-1975

ZHANG T W, JI Y J and ZHANG W F. 2022. The analysis on uncertainty resulting from method and wavelength selecting in forest height inversion using simulated polarimetric interferometric SAR data. National Remote Sensing Bulletin, 26(10): 1963-1975 [DOI: 10.11834/jrs.20210144]

1 引言

森林高度是反映森林资源数量和质量的重要参数, 它与森林蓄积量和生物量直接相关, 是森林资源调查中最重要调查因子之一, 也是进行陆地生态系统碳循环和碳储量动态分析的重要基础数据 (Kugler 等, 2015; 张蓉鑫等, 2018; 倪文俭等, 2018)。不确定性是不精确性、模糊性、不明确性等概念的总称 (秦立厚等, 2017)。在具

体应用中, 森林高度反演结果不确定性的研究与森林高度估测方法的研究同样重要。基于森林生物量计算的全球碳储量通常需要通过森林高度来减少生物量估算的误差, 因此森林高度估测结果的不确定性直接造成碳储量计算结果的不确定性 (傅煜等, 2014 和 2015; 廖展芒, 2019)。

极化干涉合成孔径雷达 PolInSAR (Polarimetric Synthetic Aperture Radar Interferometry) 技术既具有极化合成孔径雷达 PolSAR (Polarimetric Synthetic

收稿日期: 2020-05-19; 预印本: 2020-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 31860240, 32160365, 42161059); 云南省教育厅科学研究基金 (编号: 2019J0182, 2020Y0393)

第一作者简介: 张庭苇, 研究方向为林业微波遥感。E-mail: timzever@gmail.com

通信作者简介: 张王菲, 研究方向为林业微波遥感。E-mail: mekmzwf@163.com

Aperture Radar) 对植被散射体形状和方向敏感的特性, 又具有干涉合成孔径雷达 InSAR (Interferometry Synthetic Aperture Radar) 对植被散射体空间分布和高度敏感的特性, 在森林高度估测中具有极大的优势及潜力 (Cloude 和 Papathanassiou, 1998; 王超等, 2009; Treuhaft 和 Siqueira, 2000; 张林科和豆靖林, 2018)。目前, 学者们利用 PolInSAR 获得的多个观测量提出了多种森林高度估测方法, 例如: 极化相位中心高度估测法、复相干相位中心差分法、复相干幅度反演法和相干幅度、相位联合反演法等 (Cloude, 2006 和 2007; 张建双等, 2019)。由于各方法中使用的观测参数不同、模型算法不同、连接待估参数和观测参数的模型假设不同, 使得森林高度估测结果具有较大的不确定性 (吴小丹等, 2014)。当然, SAR 成像过程、SAR 信号处理、样地调查数据、样地位置、相干时间间隔等也都会引起森林高度估测结果的不确定性 (Shi, 2009)。然而, SAR 成像过程、SAR 信号处理引起的误差可由提供 PolInSAR 数据的机构负责校正, 在应用中通常不需要考虑; 已有不少研究也针对样地调查数据精度、样地位置选择等引起的不确定性展开了研究, 研究表明样地调查引起的误差对估算结果的影响较小 (赵平安, 2013)。而由森林高度估测算法引起的不确定性研究则相对较少, 在国内更是鲜有报道。Riel 等 (2018) 初步探索了 PolInSAR 数据森林高度估测中的不确定性, 并指出其估测结果的不确定性可以通过两种方法来量化, 一是直接采用概率模型来对估测算法及输入参数的不确定性进行分析, 通常包括模型分析法、误差传递法和蒙特卡洛模拟法; 二是直接与外部精确测量结果进行验证, 例如采用 Lidar 数据获取的森林高度作为外部精确测量结果。对于估测算法引起的不确定性, 他们则采用贝叶斯理论分析了基于随机体散射模型 RVoG (Random Volume over Ground) 的几种估测方法估测结果的不确定性。

考虑到基于 PolInSAR 技术进行森林高度估测的整个流程中, 不确定性可能存在于 SAR 成像、信号处理、森林高度估测、地面调查数据验证等各个阶段, 为了精确的测定仅由估测算法及微波波长引起的不确定性, 本文采用仿真数据来估测森林高度, 明确估测方法及波段选择对采用

PolInSAR 技术进行森林高度估测结果的定量影响, 以为 PolInSAR 技术森林高度估测中算法和波段的选择提供依据。

2 森林场景模拟

本文利用欧洲空间局发布的 PolSARPro 3.0 中的模拟器 PolSARprosim 获得 PolInSAR 模拟数据。在该模拟器中, 首先考虑了林木类型、林木分布和林木高度; 其次考虑了地表土壤散射特征的影响因子, 具体包括表面粗糙度、土壤湿度、方位向和距离向坡度; 最后根据林木高度、入射波频率等设置了 SAR 成像几何参数, 包括平台高度、垂直和水平基线、入射角、距离向和方位向分辨率。为了保证不引入其他方面的不确定性, 本文设置了如表 1 所示的模拟器模拟参数信息, 表 2 所示的各波段的干涉参数信息。

表 1 PolSARprosim 模拟器中各参数设置

Table1 Parameters setting of PolSARprosim simulator

参数	波段			
	P	L	C	X
平台高度/m			3000	
中心入射角/ $^{\circ}$			45	
森林类型			阔叶	
中心频率/GHz	0.65	1.3	5.35	9.6
森林高度/m			18	
森林密度/(株/ha)			300	
株数/株			85	
方位向分辨率/m			1.5	
距离向分辨率/m			1.06066	

表 2 模拟数据参数设置

Table2 Parameters setting of the simulated data

参数	波段			
	P	L	C	X
中心波长/cm	46.15	23.08	5.61	3.13
水平基线/m	20	10	10	10
垂直基线/m	1	1	8	9
模糊高/m	51.7	54.5	59.6	66.5

PolSARprosim 模拟森林场景包括 3 个步骤: (1) 林木单木几何模型构建; (2) 林木、地表散射模拟; (3) SAR 信号处理及模拟影像生成。单木几何模型构建考虑了树木生长的生物学属性, 采用由树根到树叶的任意路径, 构造单木造型,

其中树枝、树叶的生长位置采用蒙特卡洛方法随机获得,具体通过建立树干、第一级树枝、第二级树枝、第三级树枝、最后建立树叶的方法来完成。本文中模拟的森林类型为阔叶树,图1(a)描述了模拟的各波段森林场景。PolSARprosim 模拟器中将森林场景中的散射机制分为5种:地表的直接散射、森林体的直接散射、地表—森林体的二次散射、森林体—地表的二次散射、地表—森林体—地表的多次散射。散射场景中散射体的形

状采用不同单粒子散射模型来模拟:例如树干采用有限长度介电圆柱体模拟;细小枝干采用针状单体模型模拟;阔叶片采用椭圆盘单体散射模拟。地表散射特征的模拟采用了张顺生(2007)提出的散射模型及土壤介电反演模型。确定散射特征后我们模拟了各散射介电粒子电磁波回波信号,采用信号处理方法获得模拟森林场景的 PolInSAR 影像集(孙晗伟等,2015)。图1(b)展示了本研究模拟的各波段森林场景 PolInSAR 数据的主影像。

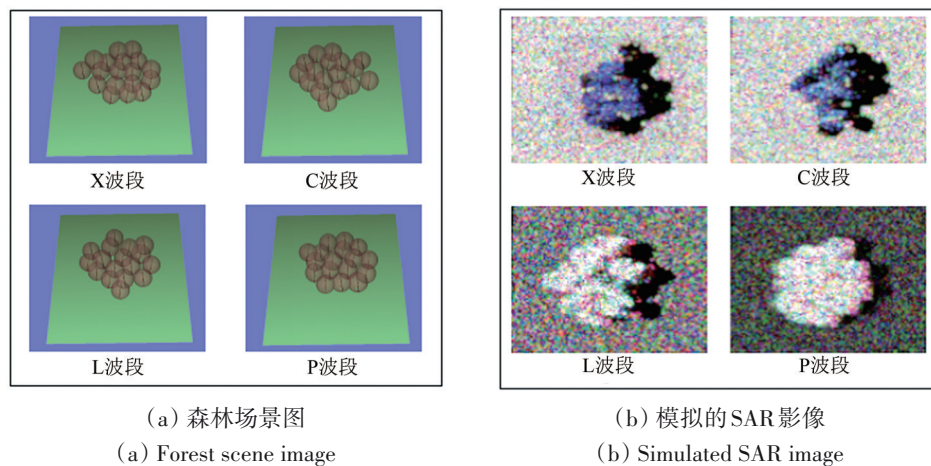


图1 PolSARprosim 模拟的森林场景及 SAR 影像

Fig. 1 Forest scene and SAR image simulated by PolSARprosim

3 基于 PolInSAR 技术的森林高度反演算法

3.1 PolInSAR 技术进行森林高度反演理论基础

传统的 InSAR 测量是标量干涉,获取的观测结果为标量干涉图。标量干涉图的产生过程可以描述为空间分离的两个天线获得的同一分辨单元的两个复标量信号 s_1 和 s_2 的平均 Hermitian 积。不同于传统的干涉测量系统,PolInSAR 进行森林高度估测的理论基础是矢量干涉技术(Cloude, 2010; 罗环敏, 2011)。矢量干涉体现在森林场景中可以理解为:通过极化合成技术形成任意极化态下的干涉极化图,该图一方面可以反映 PolSAR 图像每一个分辨单元内存在的来自地面、树干、树冠等的多种散射机制;另一方面可以形成任意极化态下的极化干涉图。PolInSAR 技术进行森林高度估测主要有 3 种方式:(1)利用森林在不同极化通道中的散射机制,直接提取各极化的散射相位中心。将代表冠层散射的相位中心与代表地表

散射的相位中心进行差值,然后通过相位差和高度的转换关系获得森林高度;(2)通过极化基合成散射空间内所有可能的散射机制,分别找出代表冠层和地表散射极化态的相位中心,然后用两者的相位差来估算森林高度;(3)首先建立植被微波散射模型(目前最常用的是 RVoG 模型),然后通过模型建立相干性或干涉相位与森林高度之间的关系,最后通过反演得到森林高度(Cloude 和 Papathanassiou, 1998; Treuhaft 和 Siqueira, 2000; 张王菲等, 2017)。

3.2 PolInSAR 技术森林高度估测算法

根据 3.1 中描述的采用 PolInSAR 技术进行森林高度估测的 3 种主要方式,可以将森林高度估测的算法分为两大类:一类是利用干涉测高原理的测量估测法,例如极化相位中心高度估测法和复相干相位中心差分法;另一类是利用植被散射模型的森林高度定量反演法,例如复相干幅度反演法和相干幅度、相位联合反演法。极化相位中心高度估测法和复相干相位中心差分法原理类似,只

是前者直接利用冠层极化散射相位中心和地表高程对应的相位中心进行差值,而后者则以极化为基础,通过合成各种极化态来寻找更具有代表性的冠层散射和地表散射相位中心进行差值,因此后者是在前者基础上的一种优化。由于本文模拟的森林场景中,地表高程值设置为0,因此使得这两种算法在形式上略有差异。为了表述方便,在原理介绍中将这两种方法统称为相位差分法。复相干幅度反演法和相干幅度、相位联合反演法均基于RVoG模型,RVoG模型具体应用中RV的表达形式有多种,最常用的表达式是指数模型,因此本文中以指数模型来描述体散射失相干。复相干幅度反演法采用了相干性幅度信息,而相干幅度、相位联合反演法采用了相干相位和幅度信息进行森林高度反演。

(1) 相位差分法。相位差分法包括极化相位中心高度估测法和复相干相位中心差分法。这两种方法基于森林覆盖区具有3种不同散射机制的假设:即代表森林冠层的体散射,代表森林树干与地表之间的二次散射和代表林下地表的表面散射(宋桂萍等,2013)。极化相位中心高度估测法通常采用HV极化通道的散射相位来表示森林冠层的散射相位中心,由于本文中模拟的地表高程值为0,所以该算法可以表示为

$$h_v = \frac{\arg(\tilde{\gamma}_{w_v})}{k_z} \quad (1)$$

式中, h_v 是估算的森林冠层高度, w_v 表示森林冠层散射机制, $\tilde{\gamma}_{w_v}$ 是 w_v 的复相干系数, k_z 是垂直有效波数。

复相干相位中心差分法的算法可以表示为:

$$h_v = \frac{\arg(\tilde{\gamma}_{w_s}) - \arg(\tilde{\gamma}_{w_v})}{k_z} \quad (2)$$

式中, w_s 表示地表散射机制, $\tilde{\gamma}_{w_s}$ 是 w_s 的复相干系数,根据先验知识,可以选择交叉极化(HV)和同极化相位中心差(HH-VV)的相位中心分别作为森林冠层的散射相位中心和地表散射的相位中心,也可根据相位中心优化算法,采用极化合成技术寻找更优的冠层和地表散射相位中心(Cloude,2006和2007;李哲,2009;张王菲等,2017)。本文中以HV和HH-VV的相位分别作为森林冠层和地表散射相位中心,研究不同算法选择引起的估测结果不确定性。

(2) 复相干幅度反演法。复相干幅度反演法

基于2000年提出的RVoG模型(Treuhaft和Siqueira,2000),RVoG模型可由式(3)(4)表示:

$$\gamma_{RVoG} = e^{i\phi} \left(\frac{\gamma_v + \mu(\omega)}{1 + \mu(\omega)} \right) \quad (3)$$

$$\gamma_v = e^{i\phi} \frac{\int_0^{h_v} e^{(2\alpha z/\cos\theta)} e^{ik_z z} dz}{\int_0^{h_v} e^{(2\alpha z/\cos\theta)} dz} \quad (4)$$

式中, γ_{RVoG} 是干涉复相干性, ϕ 是地表相位, γ_v 是体散射复相干性, $\mu(\omega)$ 是地体散射比。 α 是介质的平均消光系数, θ 是平均入射角, i 为复数符号, h_v 和 k_z 与式(1)中含义相同。假设地面反射信号和森林冠层的消光可被忽略,则RVoG模型可简化为SinC模型,即式(5):

$$\gamma_v \approx e^{i\left(\frac{k_z h_v}{2} + \phi\right)} \frac{\sin\left(\frac{k_z h_v}{2}\right)}{\frac{k_z h_v}{2}} \quad (5)$$

通过重建式(5)得到式(6),即森林高度的复相干幅度反演法。本文中,式(6)中森林冠层的体散射复相干采用HV极化通道的相干性来代替(Chen等,2016;张王菲等,2017)。

$$h_v = \frac{2\pi}{k_z} \left(1 - \frac{2 \cdot \sin^{-1}(|\gamma_v|^{0.8})}{\pi} \right) \quad (6)$$

(3) 相干幅度、相位联合反演法。相干幅度、相位联合反演法采用相位和幅度信息共同反演森林高度。根据式(2)可以快速估测森林高度,但是根据勒让德(Legendre)二次展开式获得的森林垂直剖面函数的分析可知(Cloude,2010),采用指数模型表示的冠层相位中心可能位于二分之一冠层高度到冠层顶部的任何位置,因而导致采用该方法估测的森林高度结果偏低,为了增加森林高度估测结果的鲁棒性,可以联合式(2)和式(6)进行估测结果的补偿,形成式(7)所示的森林高度(h_v)反演方法,即相干幅度、相位联合反演法。

$$h_v = \frac{\arg(\tilde{\gamma}_{w_s}) - \arg(\tilde{\gamma}_{w_v})}{k_z} + \varepsilon \frac{\pi}{k_z} \left(1 - \frac{2 \cdot \sin^{-1}(|\gamma_v|^{0.8})}{\pi} \right) \quad (7)$$

式中, ε 是权重因子,根据冠层密度等影响因子在0—1范围之间取值。当 $\varepsilon = 1$ 时,冠层没有衰减,森林的散射中心位于植被层中部,式(7)中

的 $\left(\left(\arg(\tilde{\gamma}_w) \right) - \arg(\tilde{\gamma}_v)/k_z \right)$ 贡献 $h_v/2$ 的高度值, $\left(\frac{\pi}{k_z} \left(1 - \frac{2 \cdot \sin^{-1}(|\gamma_v|^{0.8})}{\pi} \right) \right)$ 贡献 $h_v/2$ 的高度值; 当 $\varepsilon = 0$ 时, 冠层衰减无穷大, 散射相位中心在冠层顶部, 因此, $\left(\left(\arg(\tilde{\gamma}_w) \right) - \arg(\tilde{\gamma}_v)/k_z \right)$ 贡献为 h_v , $\left(\frac{\pi}{k_z} \left(1 - \frac{2 \cdot \sin^{-1}(|\gamma_v|^{0.8})}{\pi} \right) \right)$ 贡献为 0。在本文中, ε 取值为 0.4 (Cloude, 2010; 罗环敏, 2011; 张王菲等; 2017)。

3.3 不确定性量化方法

本文采用均值、标准差和不确定度来量化估测结果的不确定性。不确定度是由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度, 可用来估计测量复现性, 本文依据 JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》技术规范, 使用贝塞尔法对不确定度进行 A 类评定 (式 (8) — (11)) (倪育才, 2014)。

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (8)$$

$$S^2(X_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (9)$$

$$U(X_i) = S(X_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (10)$$

$$U(\bar{X}) = S(\bar{X}) = \frac{S(X_i)}{\sqrt{n}} \quad (11)$$

式中, X_i 是在复现性条件下模拟得到的 SAR 数据进行森林高度反演结果的样本, n 为样本总数, \bar{X} 为各结果观测值的算术平均值, $S^2(X_i)$ 和 $U(X_i)$ 分别为实验方差和实验标准差, $U(\bar{X})$ 为各估测结果的标准不确定度。

4 结果与讨论

4.1 平地相位去除影响剔除

平地相位的正确移除对森林高度估测取得正确的结果具有较大的影响。模拟 SAR 影像的干涉结果中, 为了保证相干性具有意义, 采用一定范围的像元取均值, 进而获得两幅影像的干涉图, 干涉图中平地相位的结果不仅与成像几何关系有

关, 同时受到取均值方法的影响 (图 2 (a)); 而在平地相位去除过程中计算平地相位时仅考虑几何关系 (图 2 (b)); 这使得模拟影像中的平地相位在去除后仍然无法保证相位为零值, 而是在方位向上呈线性变化 (图 2 (c)); 为了保证后续高度估测结果不受平地相位去除结果的影响, 我们对其进行了方位向相位校正 (图 2 (d))。

4.2 不同算法森林高度估测结果定性分析

采用去平后的干涉相位或干涉相干性, 分别采用 4 种方法, 可转换为森林高度 h_v 。图 3 为描述本文 3.2 节中 4 种算法分别于 X、C、L 和 P 波段的估测结果。

在 4 个波段的估测结果中, 长波长 (L 和 P 波段) 数据的估测结果在整个模拟森林覆盖区较完整, 而短波长 (X 和 C 波段) 数据则在部分区域出现了估测结果缺失的现象。L 和 P 波段的反演结果比较完整, 即在有森林覆盖的区域其估测的高度明显区别于背景值, 而 X 和 C 波段的反演结果则在某些区域出现空值, 这可能是由于短波长电磁波在森林覆盖区穿透性差, 导致回波信号较弱或无回波信号, 从而使得这些区域的森林高度估测结果出现异常值。例如图 3 中 X 和 C 波段估测结果中黑色圆圈以外的森林覆盖区域。另外, 在森林模拟场景的林缘, X 和 C 波段也出现了估测结果缺失的现象。对比图 1 (b) 模拟 SAR 影像的结果, 也可发现短波长模拟的 SAR 影像在林缘的阴影所占比例明显高于长波长影像。

模拟场景中设置的森林林分平均高度为 18 m, 而 4 种算法的估测值在各波段均围绕 18 m 波动, 并且估测值在各波段差异明显。在 X 波段的估测结果中, 极化相位中心高度估测法估测结果的动态范围在 0—16 m 之间, 估测值明显低于 18 m, 说明 X 波段对森林冠层一定的穿透能力; 复相干相位中心差分法估测结果在 -11—9 m 之间, 该算法估测的森林高度最大值约 9 m, 说明该方法会严重低估森林高度, 此外该方法会出现一些负值, 说明在某些森林区域, 存在 HV 的相位中心低于 HH-VV 相位中心的现象; 复相干幅度反演法的估测结果在 0—35 m 之间, 多数区域的估测值在 15 m 左右, 说明该算法有较好的估测结果, 但是会出现部分区域高估的现象, 说明在这些区域较难获得

纯体散射相干系数；相干幅度、相位联合反演法的估测结果在 $-5\sim 20\text{ m}$ 之间，且多数估测数值位于 $10\sim 15\text{ m}$ 之间。相比X波段，C波段各算法估测结果的波动范围都进一步增大，在4个波段中各种算法估测结果的波动范围均最大。L波段极化相位中心高度估测法估测结果接近 18 m ，复相干幅度反演法和相干幅度、相位联合反演法的估测结果在面向雷达向（场景左侧）估测结果接近 18 m ，而在背离雷达向（场景右侧）则出现明显的低估

现象，这可能是由于场景右侧的信号来源为穿透性信号，信号较弱，相干性较低引起的，而这两种方法在P波段的估测中则未出现明显的影响，也从侧面说明了P波段更强的穿透能力。该现象也可通过P波段极化相位中心高度估测法估测结果较L波段偏低的现象中得到解释。综合以上分析可知，森林高度的估测结果不仅受到算法的影响，在使用同一估测算法时，波长的变化也会明显的影响森林高度的估测结果。

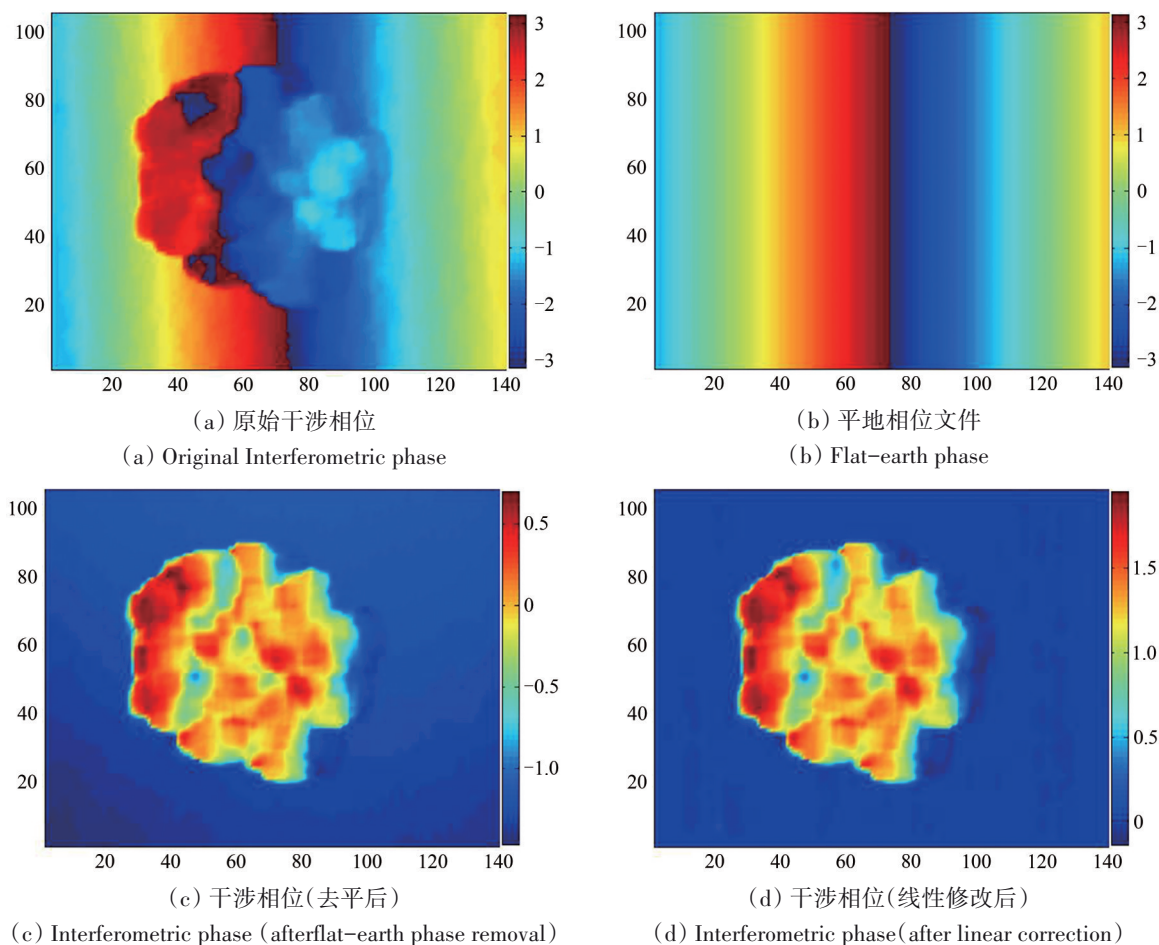


图2 P波段HH极化去平前后相位变化

Fig. 2 Phase change of P-band HH polarization with flat-earth phase removal (after linear correction)

4.3 不同算法森林高度估测结果定量分析

本文从以下两个方面对估测结果进行了定量分析：(1) 波长一定时，不同算法对森林高度估测结果的影响；(2) 波长变化时，同一种算法估测的森林高度结果差异。为了使评价结果更能表征各个波段在没有遮挡情况下的森林高度估测的不确定性，选取了估测结果中比较均匀的区域（图3黑色圆圈部分）进行定量分析，首先使用

概率密度函数PDF（Probability Density Function，图4）和累积分布函数CDF（Cumulative Distribution Function，图5）分析了各估测结果的分布特征，然后统计了各估测结果的均值、标准差和标准不确定度（表3）。为了使定量分析的结果更为客观，同时也选取了各估测结果影像中的第53行19—98列作剖面线，并统计剖面线处像元的均值和标准差，统计结果见表4。

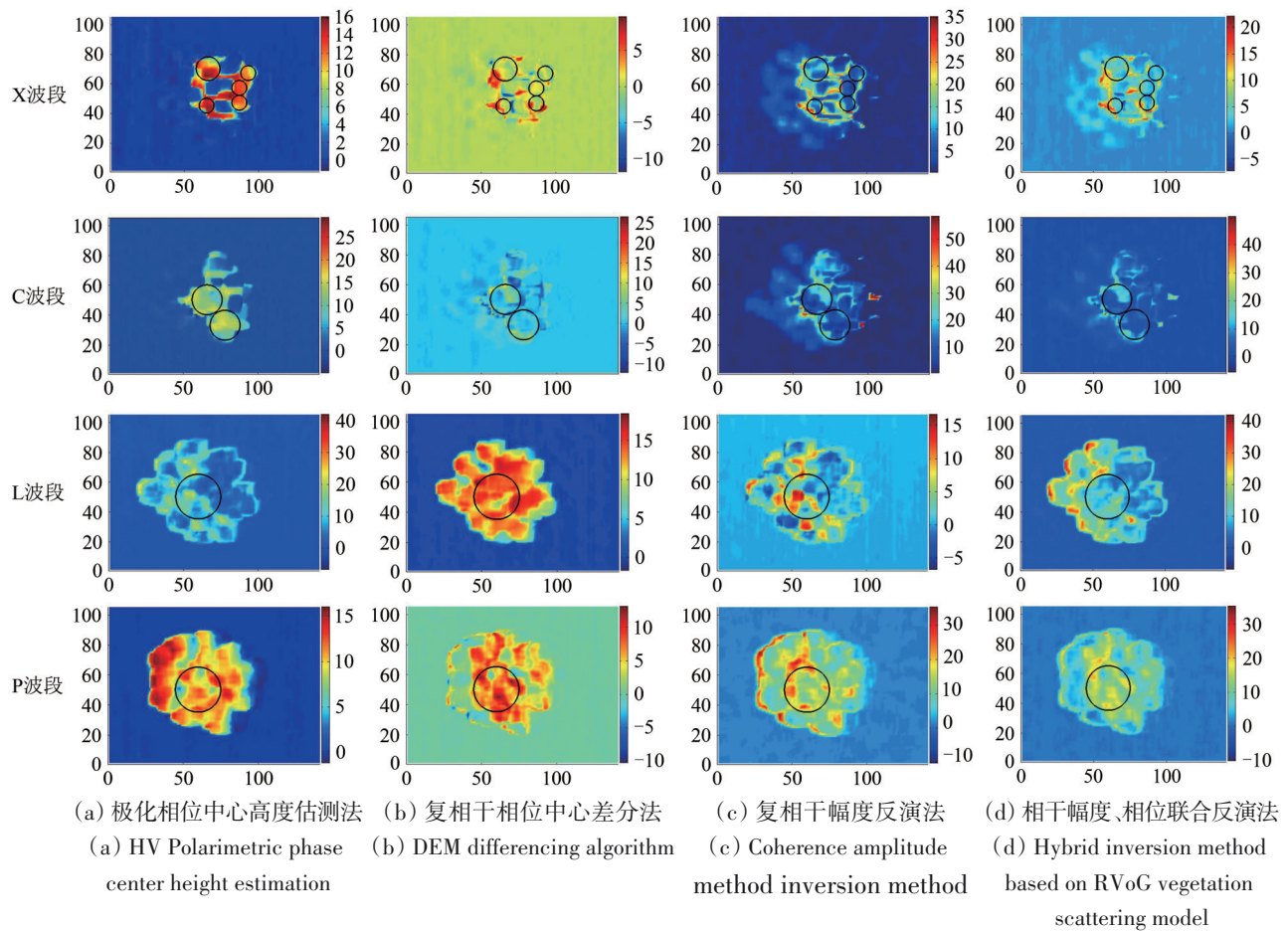


图3 4种算法在X、C、L和P波段的森林高度估测结果

Fig. 3 Forest height estimation results of four algorithms in X, C, L and P bands

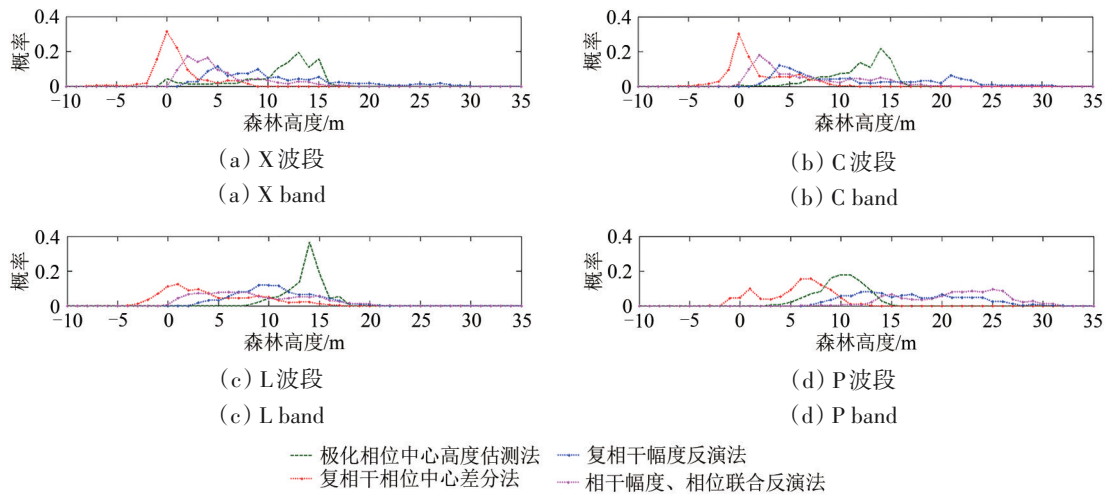


图4 不同波段反演结果概率密度函数(PDF)图

Fig. 4 Probability density function image of forest height estimation results in X, C, L and P bands

从CDF图中可以看出,所有估测结果取值均较分散,极化相位中心高度估测法估测结果值分布则相对集中,其可能原因是极化相位中心法高度估测过程中使用的反演参数最少。其次,X和C波段复相干相位中心差分法的估测结果值最为集

中,PDF图峰值在0.3左右,但其取值在0左右,说明使用较短波长获取的PolInSAR数据进行森林高度反演时,HV和HH-VV的相位中心位置几乎无法区分;而对于使用较长波长的L波段的反演结果中,复相干幅度反演法估测结果值最为集中,

峰值接近 15 m, 且可能性将近 0.4; P 波段模拟结果中, 4 种方法的反演值都较分散, 可能性均低于 0.2, 反演不确定度较大。

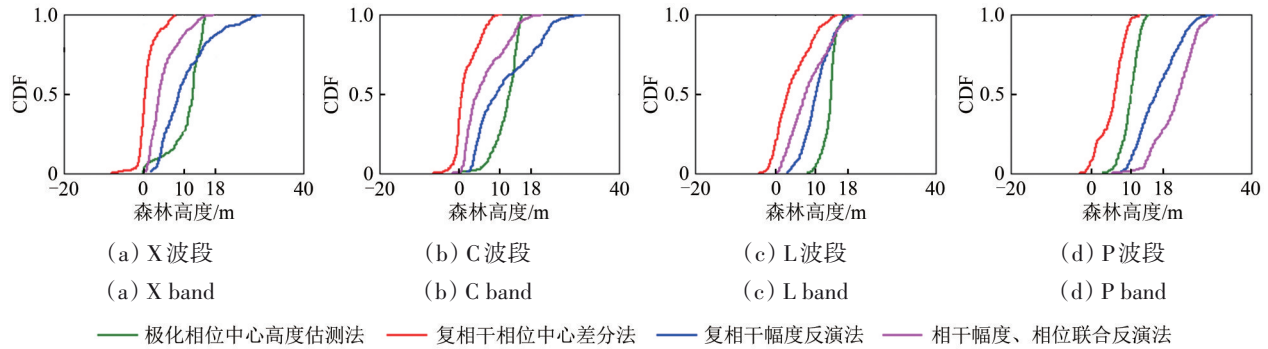


图5 不同波段反演结果累积分布函数(CDF)图

Fig. 5 Forest height estimation results of CDF in X, C, L and P bands

表3 采样部分森林高度反演结果

Table 3 Sampling part inversion results of forest height

波段	统计量	方法			
		极化相位中心高度估测法	复相干相位中心差分法	复相干幅度反演法	相干幅度、相位联合反演法
X	均值	10.94	0.93	10.43	5.11
	标准差	3.15	2.15	6.11	3.56
	区间 P=80%	[5.1, 15.0]	[-2.5, 2.5]	[2.8, 16.4]	[0.6, 8.5]
	标准不确定度 $U(\bar{X})$	0.177	0.103	0.278	0.165
C	均值	13.67	1.17	13.04	6.38
	标准差	3.93	2.69	7.64	4.45
	区间 P=80%	[8.7, 15.4]	[-2.2, 5.5]	[3.8, 22.3]	[0.6, 8.5]
	标准不确定度 $U(\bar{X})$	0.120	0.117	0.293	0.199
L	均值	13.69	4.26	10.5	8.46
	标准差	1.74	4.48	3.58	5.02
	区间 P=80%	[11.9, 16.6]	[-2.7, 9.0]	[5.7, 14.9]	[0.2, 13.6]
	标准不确定度 $U(\bar{X})$	0.065	0.168	0.134	0.189
P	均值	9.96	5.43	16.82	21.23
	标准差	2.2	3.19	5.27	4.86
	区间 P=80%	[7.0, 12.8]	[1.0, 9.5]	[10.0, 23.7]	[14.1, 26.5]
	标准不确定度 $U(\bar{X})$	0.083	0.120	0.198	0.183

表4 剖面线森林高度反演结果

Table 4 Section line part inversion results of forest height

方法	波段							
	P		L		C		X	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
极化相位中心高度估测法	8.65	4.28	12.46	3.07	3.97	5.91	4.54	5.56
复相干相位中心差分法	4.12	3.53	2.70	4.63	-0.12	2.84	0.10	2.55
复相干幅度反演法	12.28	4.98	12.83	6.45	10.94	8.21	6.87	6.07
相干幅度、相位联合反演法	18.94	4.92	13.32	5.55	2.63	3.57	4.47	4.38

4.3.1 各波段不同算法森林高度估测结果分析

由于本文反演的森林高度值均不是均匀分布函数,从图5难以分析具体的不确定性,所以选取表3所示均值、标准差、80%数据所在区间以及标准不确定度4个统计量对反演结果进行定量分析:在波长最长的P波段中,复相干幅度反演法反演结果平均值最接近设定的森林平均高度18 m,其均值为16.82 m;但由于其标准差为5.27 m,说明估测结果较其他方法离散度较大,各个估测值的差异较大,结果较不稳定。观测图3及表3的估测结果也发现,尽管该方法中多数估测值均在10—20 m之间,但是还是存在少量估测值在20—30 m之间,超过真值的50%左右,这可能是由于P波段的纯体散射相干系数不容易获得引起的;相干幅度、相位联合反演法反演结果也较好,其平均值为21.23 m,是所有结果中唯一高估了森林高度的估测方法,但其高估部分不超过20%;极化相位中心高度估测法估测的森林高度均值为9.96 m,约为真值的一半,这说明P波段的HV通道在森林中的散射相位中心较低,基本可以穿透到森林高度的一半,且该方法的标准差及不确定度较小,说明HV的相位中心在匀质的森林覆盖区基本稳定。复相干相位中心差分法则严重低估了森林高度。L波段波长较P波段稍短,极化相位中心高度估测法的反演结果最优,采样结果平均为13.69 m,标准差为1.74 m,这可能是由于散射模型的散射机理更接近L波段的散射特征;其次是复相干幅度反演法,估测结果的均值和标准差分别为10.5 m和4.48 m;而复相干相位中心差分法和相干幅度、相位联合反演法都严重的低估了森林高度,其平均值分别为4.26 m和8.46 m。C波段极化相位中心高度估测法和复相干幅度反演法反演结果的均值都较接近设定的真实值,但复相干幅度反演法标准差和不确定度分别为7.64 m和0.293,结果很不稳定,不确定度高;相干幅度、相位联合反演法估测结果的均值6.38 m,标准差为4.45 m,说明该方法在C波段估测结果较差;而复相干相位中心差分法估测结果的均值仅为1.17 m,严重的低估了森林高度。通过分析图4中C波段的CDF图可知,该方法的估测值集中在1 m左右。4个波段中X波段波长最短,与C波段估测结果相似,4种方法在X波段的反演结果中,极化相位中心高度估测法和复

相干幅度反演法反演结果的均值较接近设定的真实值,但极化相位中心高度估测法标准差比复相干幅度反演法小近1倍,说明估测值的离散程度小,HV冠层散射相位中心较稳定;而相干幅度、相位联合反演法和复相干相位中心差分法虽然标准差较小,但从这两种方法估测结果的均值看,两种方法均明显低估森林高度。

对比表3和表4的结果可知,对于P波段,两种量化分析的结果类似,但表4中相干幅度、相位联合反演法在L波段也有较好的估测结果,观察图3可以发现相干幅度、相位联合反演法的采样范围包括了较多的低估值区域,即影像中穿透性信号的区域。该方法的研究结果与Nghia(2014)采用L-波段模拟数据进行森林高度反演的结果基本一致。周筑博(2013)在L波段4种估测方法估测森林高度的研究结果也表明极化相位中心高度估测法和复相干相位中心差分法会严重低估森林高度;而复相干幅度反演法和相干幅度、相位联合反演法的反演结果则较接近真实的森林高度。

表4中C波段极化相位中心高度估测法估测结果的均值较表3中的结果降低明显,这是由于表4的剖面线穿过了大量估测结果为0值的区域,这与X波段的情况类似。综合4个波段的研究结果发现:波长较长的P、L波段中,复相干幅度反演法和相干幅度、相位联合反演法估测结果较好,但是复相干幅度反演法估测结果的离散度较高,这可能是由于模拟影像相干性处理过程中多视数较小,随机性过高引起的。已有研究指出:相干性作为一个统计值,经过一定的窗口平均后才会接近真实值(Cloude, 2010)。罗环敏等(2010和2011)对比L波段SAR影像森林高度的估测结果也表明相干幅度、相位联合反演法可以取得较好的估测结果且标准差较小。对于波长较短的C和X波段,复相干幅度反演法的估测结果也最好,但是离散程度较P和L波段明显增大,单点估测值的离散程度更大。此外,极化相位中心高度估测法也有较好的估测结果,该方法等同于干涉测量中采用干涉获得的冠层高(DSM)与真实地表高度(DEM)的差值,该研究结果与范亚雄采用X波段的研究结论基本一致(范亚雄, 2019)。

4.3.2 各算法不同波段高度估测结果分析

SAR数据中,波长不同,森林场景的散射特

征不同。本文模拟了目前干涉 SAR 森林高度估测中常用的频段, 即 P (46.15 cm)、L (9.68 cm)、C (5.61 cm) 和 X (3.13 cm) 波段。其中, P 波段波长较长, 对森林穿透性强, 散射相位中心接近地表, 而 X 波段波长较短, 其散射主要由冠层树叶等主导, 散射相位中心位于森林冠层, 所以当波长变化时, 同一种算法估测的森林高度结果具有较明显差异。对比表 3 和表 4 可知: 复相干幅度反演法在 4 个波段都表现出了较好的反演性能, 在表 3 中, 80% 样本数据所在区间相较于其它 3 种方法更接近于设定的森林高度理论值, P 波段和 C 波段的反演均值分别为 16.82 m 和 13.04 m, L 波段和 X 波段次之, 为 10.5 m 和 10.43 m, 4 个波段标准不确定度分别为 0.278、0.293、0.134 和 0.198, 反演结果不稳定且不确定度大; 极化相位中心高度估测法在 4 个波段的估测结果都稍低于设定的理论森林高度值, 在 L 波段, 森林高度反演结果数值最为集中, 80% 的值分布在 11.9—16.6 m, 且其标准不确定度和标准差分别为 0.065 和 1.74 m, 在所有反演结果中最小, 说明在 L 波段, HV 极化相位中心能较好地表示森林冠层相位。而 P 波段和 X 波段反演结果均值分别为 9.96 m 和 10.94 m, 标准差为 2.2 m 和 3.15 m, 数据值波动也较小, 说明该方法在各个波段中均具有较好的估测结果, 但由于微波的穿透性, 其冠层相位中心仍有一定程度的低估; 复相干相位中心差分法在 4 个波段 80% 反演结果均低于原始设定森林高度的一半, 严重低估了森林高度, X 和 C 波段 80% 样本的估测结果值分别分布于 -2.5—2.5 m 以及 -2.2—5.5 m, 说明较短波长获取的 HV 极化相位中心和 HH-VV 极化相位中心几乎不能区分冠层相位中心和地表相位中心: 从长波段 P 波段到短波段 X 波段, 其反演结果均值分别为 5.43 m、4.26 m、1.17 m 和 0.93 m, 也说明波长越短, HV 和 HH-VV 的极化相位中心越接近。综合表 3 和表 4, 并且对比基于真实 SAR 数据的已有研究结果可知: 相干幅度、相位联合反演法的结果在各个波段估测结果均略低于复相干幅度反演法; 而在较长的 P 和 L 波段, 其大部分反演结果数值分布范围和设定的理论范围 (图 5 (c) 和 (d)) 较接近, 但由于其输入参数较多, 同时使用了复相干幅度值和相位值, 模型较为复杂, 导致在 4 个波段的结果不确定度均较大, 分别为 0.165、0.199、0.189 和 0.183。在表 3 中也可以看出, 本次

实验的部分波段反演结果中有一定的低估, 但表 4 中其估测结果与真实值更为接近。曹霸等 (2016) 采用 PolSARprosim 获得的 PolInSAR L 和 X 波段数据进行森林高度反演的研究同样表明了复相干幅度反演法较好的反演性能。

5 结 论

随着 InSAR、PolInSAR 数据的不断丰富, 基于 PolInSAR 数据的森林高度反演成为目前森林参数定量反演中的研究热点之一, 近 20 多年来学者们基于森林的 SAR 散射机制提出了多种森林高度的反演算法。本文中采用的 4 种算法是目前最具有代表性的几种森林高度反演算法。然而由于森林在不同波段的散射机制不同, 因此各类算法在不同波段的估测结果也差异明显; 另外不同估测算法基于的估测原理不同, 也使得各类方法的估测结果有所差异。本文以模拟数据为例, 分别对比了 4 种常用的基于 PolInSAR 数据的森林高度估测算法在 4 种常用波段 (P、L、C 和 X) 的估测结果, 并分析了算法、波长选择对估测结果的影响, 研究得出以下 3 点结论:

(1) 在森林场景基本一致的情况下, 估测算法的选择直接影响森林高度估测结果的精度。复相干幅度反演法和相干幅度、相位联合反演法在 4 个波段均可以取得与真实场景均值更接近的结果, 但相干幅度、相位联合反演法反演结果精度略低于复相干幅度反演法; 另外, 复相干幅度反演法点对点的估测结果离散程度较大, 而相干幅度、相位联合反演法中各像元估测结果的值偏离度较小。采用 HV 和 HH-VV 分别代表冠层散射相位中心和地表散射相位中心采用相位差分法进行森林高度反演, 会严重低估森林高度。

(2) 波长对 4 类估测方法的影响差异明显。复相干幅度反演法在 P 波段取得最好的估测结果, 但是在其他 3 个波段中, 反演结果则区别不是很明显; 相干幅度、相位联合反演法受到波长影响明显, 在长波长中反演结果精度较高, 但是在短波长中, 反演结果精度显著降低; 极化相位中心高度估测法在 P 波段严重低估森林高度, 在其他波段尽管也有一定程度的低估, 但还是较适用于森林高度的估测。

(3) 波段的选择、估测方法的选择直接影响估测结果的不确定度。短波长波段中复相干相位

中心差分法不确定度最低;长波长波段中,极化相位中心高度估测法不确定度最低;而复相干幅度反演法估测结果在多数波段中的不确定度均较大。

尽管本文通过模拟数据的研究得到了以上结论,但由于模拟数据中森林场景为匀质森林,而现实中的森林由于环境、森林类型、结构等影响,异质性强,未来需要进一步结合森林的特征考虑估测方法和波长的选择。

参考文献(References)

- Cao B, Yang X M, Xiao L, Lu P, Wang Y Q, Yue C R and Yu W L. 2016. Study on forest tree height inversion based on polarization interference SAR data. *Forest Resources Management*, (6): 100-105 (曹霸, 杨小梅, 肖玲, 卢鹏, 王应泉, 岳彩荣, 于维莲. 2016. 基于极化干涉 SAR 数据森林树高反演算法比较. *林业资源管理*, (6): 100-105) [DOI: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2016.06.019]
- Chen H, Cloude S R and Goodenough D G. 2016. Forest canopy height estimation using Tandem-X coherence data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(7): 3177-3188 [DOI: 10.1109/jstars.2016.2582722]
- Cloude S R. 2006. Polarization coherence tomography. *Radio Science*, 41(4): RS4017 [DOI: 10.1029/2005RS003436]
- Cloude S R. 2007. Tutorial of the ESA Polarimetric SAR Processing (PolSARPro) Toolbox, 331-332[2020-05-01]. <http://earth.esa.int/polsarpro/>
- Cloude S R. 2010. *Polarisation: Applications in Remote Sensing*. New York: Oxford University Press: 234-240
- Cloude S R and Papathanassiou K P. 1998. Polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(5): 1551-1565 [DOI: 10.1109/36.718859]
- Fan Y X. 2019. *Forest Height Estimation Method Using Space-borne X-band SAR Interferometry*. Beijing: Chinese Academy of Forestry (范亚雄. 2019. 星载 X-波段干涉 SAR 森林高度估测方法研究. 北京: 中国林业科学研究院)
- Fu Y, Lei Y C and Zeng W S. 2014. Uncertainty assessment in regional-scale above ground biomass estimation of Chinese fir. *Scientia Silvae Sinicae*, 50(12): 79-86 (傅煜, 雷渊才, 曾伟生. 2014. 区域尺度杉木生物量估计的不确定性度量. *林业科学*, 50(12): 79-86) [DOI: 10.11707/j.1001-7488.20141211]
- Fu Y, Lei Y C and Zeng W S. 2015. Uncertainty analysis for regional-level above-ground biomass estimates based on individual tree biomass model. *Acta Ecologica Sinica*, 35(23): 7738-7747 (傅煜, 雷渊才, 曾伟生. 2015. 单木生物量模型估计区域尺度生物量的不确定性. *生态学报*, 35(23): 7738-7747) [DOI: 10.5846/stxb201405130980]
- Kugler F, Lee S K, Hajnsek I and Papathanassiou K P. 2015. Forest height estimation by means of Pol-InSAR data inversion: the role of the vertical wavenumber. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(10): 5294-5311 [DOI: 10.1109/tgrs.2015.2420996]
- Li Z. 2009. *Inversion of Mean Forest Height Using Polarimetric SAR Interferometry*. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences (李哲. 2009. 基于极化干涉 SAR 的森林平均树高反演算法研究. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所)
- Liao Z M. 2019. *Forest Aboveground Biomass Estimation Using PolInSAR Data*. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China (廖展芒. 2019. 森林地上生物量极化干涉 SAR 反演方法研究. 成都: 电子科技大学)
- Luo H M. 2011. *Models and Methods of Extracting Forest Structure Information by Polarimetric SAR Interferometry*. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China (罗环敏. 2011. 基于极化干涉 SAR 的森林结构信息提取模型与方法. 成都: 电子科技大学)
- Luo H M, Chen E X, Chen J and Li X W. 2010. Forest height estimation methods using polarimetric SAR interferometry. *Journal of Remote Sensing*, 14(4): 806-821 (罗环敏, 陈尔学, 程建, 李小文. 2010. 极化干涉 SAR 森林高度反演方法研究. *遥感学报*, 14(4): 806-821) [DOI: 10.11834/jrs.20100414]
- Nghia P M. 2014. *Research on Forest Height Estimation from Polarimetric SAR Interferometry Images*. Harbin: Harbin Institute of Technology (范明义. 2014. 极化干涉 SAR 图像森林高度估计算法研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学)
- Ni W J, Zhang D F, Wang Y, Pang Y, Zhang Z Y, Liu J L, He Y T and Guo W. 2018. Extraction of forest height by using GF-2 cross-track stereo images. *Journal of Remote Sensing*, 22(3): 392-399 (倪文俭, 张大凤, 汪垚, 庞勇, 张志玉, 刘见礼, 何亚婷, 郭伟. 2018. 高分二号异轨立体数据的森林高度提取. *遥感学报*, 22(3): 392-399) [DOI: 10.11834/jrs.20187088]
- Ni Y C. 2014. *Evaluation about Uncertainty of the Practical Measurement (3th ed)*. Beijing: Standard Press of China: 78-80 (倪育才. 2014. 实用测量不确定度评定(3版). 北京: 中国标准出版社: 78-80)
- Qin L H, Zhang M Z, Zhong S H and Yu X H. 2017. Model uncertainty in forest biomass estimation. *Acta Ecologica Sinica*, 37(23): 7912-7919 (秦立厚, 张茂震, 钟世红, 于晓辉. 2017. 森林生物量估算中模型不确定性分析. *生态学报*, 37(23): 7912-7919) [DOI: 10.5846/stxb201609281973]
- Riel B, Denbina M and Lavalle M. 2018. Uncertainties in forest canopy height estimation from polarimetric interferometric SAR data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(10): 3478-3491 [DOI: 10.1109/jstars.2018.2867789]
- Shi W Z. 2009. *Principles of Modeling Uncertainties in Spatial Data and Spatial Analyses*. Boca Raton: CRC Press: 11-16 [DOI: 10.

- 1201/9781420059281.sec1]
- Song G P, Zuo T Y, Wang C C, Xie Q H and Fu H Q. 2013. An new vegetation height estimation method based on scattering mechanism decomposition and ESPRIT algorithm. *Modern Surveying and Mapping*, 36(5): 6-10 (宋桂萍, 左廷英, 汪长城, 解清华, 付海强. 2013. 基于散射机制分解的ESPRIT植被高度反演新方法. *现代测绘*, 36(5): 6-10) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-4097.2013.05.002]
- Sun H W, Zeng T, Yang J and Li W M. 2015. Simulation and analysis of SAR residual phase error on forest height inversion. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 40(2): 153-158 (孙晗伟, 曾涛, 杨健, 李文梅. 2015. SAR残余相位误差对森林高度反演影响的全链路模拟与分析. *武汉大学学报(信息科学版)*, 40(2): 153-158) [DOI: 10.13203/j.whugis20130052]
- Treuhaft R N and Siqueira P R. 2000. Vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar. *Radio Science*, 35(1): 141-177 [DOI: 10.1029/1999rs900108]
- Wang C, Zhang H, Tang Y X, Zhang B, Wu F and Wu H A. 2009. Exploration and practice of InSAR surveying research. *Journal of Remote Sensing*, 13(S1): 226-236 (王超, 张红, 汤益先, 张波, 吴樊, 吴宏安. 2009. 合成孔径雷达干涉测量(InSAR)研究的探索与实践. *遥感学报*, 13(S1): 226-236) [DOI: 10.11834/jrs.20090030]
- Wu X D, Xiao Q, Wen J G, Liu Q, Peng J J and Li X W. 2014. Advances in uncertainty analysis for the validation of remote sensing products: take leaf area index for example. *Journal of Remote Sensing*, 18(5): 1011-1023 (吴小丹, 肖青, 闻建光, 刘强, 彭菁菁, 李小文. 2014. 遥感数据产品真实性检验不确定性分析研究进展. *遥感学报*, 18(5): 1011-1023) [DOI: 10.11834/jrs.20143332]
- Zhang J S, Fan W Y and Yu Y. 2019. Forest height inversion method based on baseline selection using multi-baseline PolInSAR. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 50(12): 221-230 (张建双, 范文义, 于颖. 2019. 基于多基线PolInSAR基线选择的森林高度反演方法. *农业机械学报*, 50(12): 221-230) [DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.025]
- Zhang L K and Dou J L. 2018. Forest height inversion using single baseline P-band of polarimetric SAR interferometry. *Science of Surveying and Mapping*, 43(10): 96-101, 116 (张林科, 豆靖林. 2018. 森林高度的单基线P波段PolInSAR反演. *测绘科学*, 43(10): 96-101, 116) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2018.10.015]
- Zhang R X, Xing Y Q, Zhang X W, Ding J H and Cai L T. 2018. Effect of laser off-nadir angle on estimating forest canopy height. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 38(9): 26-33 (张蓉鑫, 邢艳秋, 张新伟, 丁建华, 蔡龙涛. 2018. ICESat-GLAS激光天顶角对反演森林冠层高度的影响. *中南林业科技大学学报*, 38(9): 26-33) [DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2018.09.005]
- Zhang S S. 2007. Study on Natural Scene Simulation of SAR. Beijing: Beijing Institute of Technology (张顺生. 2007. 合成孔径雷达自然场景回波仿真技术研究. 北京: 北京理工大学)
- Zhang W F, Chen E X, Li Z Y, Zhao L and Ji Y J. 2017. Development of forest height estimation using InSAR/PolInSAR technology. *Remote Sensing Technology and Application*, 32(6): 983-997 (张王菲, 陈尔学, 李增元, 赵磊, 姬永杰. 2017. 干涉、极化干涉SAR技术森林高度估测算法研究进展. *遥感技术与应用*, 32(6): 983-997) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2017.6.0983]
- Zhao P A. 2013. Error Analysis on Spatial Estimation of Regional Forest Carbon Distribution. Hangzhou: Zhejiang A and F University (赵平安. 2013. 区域森林碳分布空间估计误差分析. 杭州: 浙江农林大学)
- Zhou Z B. 2013. Research of Forest Height Extraction and Data Simulation Polarimetric SAR Interferometry. Qingdao: Shandong University of Science and Technology (周筑博. 2013. 基于极化干涉SAR数据模拟以及森林树高提取研究. 青岛: 山东科技大学)

The analysis on uncertainty resulting from method and wavelength selecting in forest height inversion using simulated polarimetric interferometric SAR data

ZHANG Tingwei^{1,2}, JI Yongjie³, ZHANG Wangfei¹

1. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;
2. Changsha Urban Planning Information Service Center, Changsha 410004, China;
3. School of Geography and Ecotourism, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

Abstract: Forest height is an important indicator for representing the quality and quantity of forest resources. Polarimetric synthetic aperture radar interferometry (PolInSAR) technology has been demonstrated and validated as a potential way for forest height inversion and mapping in recent years. Airborne and spaceborne PolInSAR data have been applied in a variety of temperate, boreal, and tropical forests. However, for the distinctions of forest scattering mechanisms at different microwave length and the different theory-base of each estimation

algorithm, uncertainties usually occurred during the procedure of forest height estimation and mapping using PolInSAR data. In order to clarify the uncertainties resulting from the selection of different microwave wavelength algorithms in the procedure of forest height inversion, this study discussed the effects caused by the four selected inversion algorithms and four typical microwave wavelength using a simulated forest scene. The four inversion algorithms include polarimetric phase center height estimation method (PPC), complex coherence phase center differencing algorithm (CCPCD), coherence amplitude inversion method (CAI), and hybrid inversion method using both phase and coherence information. The involved microwave bands are at P, L, C, and X bands. Results of this study demonstrated that the effects of the wavelength and estimation algorithm are evident on the performance of forest height estimation using PolInSAR data. First, the selected estimation algorithm directly affects the results accuracy of forest height estimation when the microwave wavelength is the same. The estimated results from CAI agree well with the average forest height in the simulated forest scene and show best performance at the four selected microwave bands, but the degrees of dispersion and the ratios of uncertainty of the estimated results are also highest among the four inversion algorithms. Second, it shows obvious effects of microwave wavelength on the performance of the four selected inversion algorithms. It shows no obvious effect on CAI method. However, it shows great effects on the performance of the hybrid inversion method. The estimation results acquired from hybrid inversion method show a better performance at long wavelength (P- and L- bands), but a worse performance at short wave length (C- and X- bands). Moreover, the results reveal great underestimation of CCPCD method, which usually using HV channel phase as the canopy scattering phase center and the phase difference between HH and VV channels as the surface scattering phase center to retrieve the forest height. The uncertainties of estimation results depend on wavelength and algorithm selections. Short wavelength with CCPCD method and long wavelength with PPC method show better performance and the lowest uncertainties on forest height estimation, whereas CAI method shows the highest uncertainties in forest height estimation at P, L, C, and X bands.

Key words: PolInSAR, forest height, uncertainty, inversion, simulated forest scene

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 31860240, 32160365, 42161059); Scientific Research Foundation of Education Department of Yunnan Province (No. 2019J0182, 2020Y0393)