

基于多基线 PolInSAR 基线选择的森林高度反演方法

张建双^{1,2} 范文义^{1,2} 于 颖^{1,2}

(1. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; 2. 东北林业大学森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 哈尔滨 150040)

摘要: 为了解决单基线 PolInSAR 在更宽的森林高度范围内反演森林高度误差大的问题, 提出了多基线 PolInSAR 的基线选择方法。使用 JPL/NASA 于 2016 年 2 月 27 日在加蓬森林区域获得 UAVSAR L 波段 5 个轨道的多基线全极化 PolInSAR 数据反演森林高度, 基于相干分离最大算法 (Maximum coherence difference, MCD) 使复相干达到最大分离, 改进 PROD 方法与 ECC 方法, 并对这两种方法进行对比分析, 同时使用 NASA 于 2016 年 3 月 4 日获取的激光雷达数据 LVIS RH100 验证反演的森林高度。通过绘制两种基线选择方法对应的 k_z 、冠层复相干幅度与 LVIS RH100 的密度图来评估 ECC 方法和 PROD 方法选择基线的差异, 并结合获得的森林高度图、误差图、密度图, 分析对比两种基线选择方法的优劣。反演的森林高度出现低估高大森林 (误差为负值)、高估低矮森林 (误差为正值) 的现象, 同时低矮与高大森林区域的误差较大, 且 ECC 方法的低估或高估的程度比 PROD 方法大, 精度低于 PROD 方法。ECC 方法将相干区域的线性程度作为判断标准, PROD 方法综合考虑了复相干的相干分离程度 (相干直线的拟合效果) 与复相干幅度, 在一定程度上缓解了 ECC 方法低估高大森林与高估低矮森林的问题, 反演的森林高度优于 ECC 方法, 精度比 ECC 方法提高了 9.63%。PROD 方法更适用于反演低矮与高大森林, ECC 方法更适用于反演中等高度的森林。

关键词: 多基线 PolInSAR; 森林高度; 基线选择方法; ECC 方法; PROD 方法

中图分类号: S758; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)12-0221-10

Forest Height Inversion Method Based on Baseline Selection
Using Multi-baseline PolInSAR

ZHANG Jianshuang^{1,2} FAN Wenyi^{1,2} YU Ying^{1,2}

(1. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2. Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management, Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: To accurately inverse the forest height over a wider range, it is necessary to study the baseline selection method for multi-baseline PolInSAR data to alleviate large errors in forest height inversion over a wider range from single-baseline, exploring a better baseline selection method. The UAVSAR L-band multi-baseline full PolInSAR data was used from five orbits obtained by JPL/NASA in Pongara, Gabon forest on February 27, 2016. Based on the maximum coherence difference (MCD) coherent optimization algorithm to make complex coherence maximum separation, the PROD method and the ECC method were improved, compared and analyzed; and verified by using the LiDAR data LVIS RH100 obtained by NASA on March 4, 2016. The error maps of the difference between the forest height and the LVIS RH100 inverted by the two baseline selection methods were plotted to analyze the results of the forest height inversion. And the density maps of the k_z , canopy coherence amplitude corresponding to the two baseline selection methods and LVIS RH100 were plot to directly evaluate the difference between the ECC method and the PROD method selecting the baseline, and comparing and analyzing the pros and cons of the two baseline selection methods. Combined with these drawn graphs (forest height maps, error maps and density maps), the forest heights inverted by the two baseline selection methods were compared and analyzed. The error in low and high forest areas was large. The high forests were underestimated (the

收稿日期: 2019-09-02 修回日期: 2019-10-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0502700)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572019CP12)

作者简介: 张建双(1991—),女,博士生,主要从事微波遥感研究,E-mail: zhangjs_rs@126.com

通信作者: 范文义(1965—),男,教授,主要从事林业遥感研究,E-mail: fanwy@163.com

error was negative), and the forests in the low areas were overestimated (the error was positive). The underestimated or overestimation of the ECC method was greater than the PROD method, and the accuracy was inferior to the PROD method. The two methods had good consistency compared with the LVIS RH100 data. The linear equation of the ECC method and LVIS RH100 was $y = 0.50x + 10.60$ and $R^2 = 0.69$. The fitted linear equation of the PROD method was $y = 0.63x + 8.21$ and $R^2 = 0.70$. Validated with the LVIS RH100 data, the RMSEs of the ECC method and PROD method were 9.80 m and 8.86 m, respectively. The accuracy of the PROD method was improved by 9.63% than that of the ECC method. For low and high forest areas, when coherence separation or coherence amplitude between complex coherence was small, the degree of complex coherence separation and complex coherence amplitude were the main factor affecting forest height inversion. The PROD method comprehensively considered the complex coherence amplitude and coherence separation, so the PROD method was more suitable for inverting forest height than the ECC method. In medium-high forest areas, when the complex coherence was more dispersed and the coherence amplitude had not reached saturation, the straight line fitting effect of the coherence region was an important factor for forest height inversion. The ECC method was more suitable for inverting the forest height than the PROD method. The results demonstrated that the forest height inverted by the two baseline selection methods was consistent with LVIS RH100. The ECC method only took the linearity of the coherent region as the criterion. Because of taking into account the fitting effect and coherence amplitude of the coherent line, the forest height inverted by the PROD method was better and closer to the LVIS RH100 than the ECC method, alleviating the phenomenon that the ECC method underestimated tall forests and overestimated low forests to some extent. The PROD method was more suitable for forest height inversion in low and high forest areas, and the ECC method was more suitable for forest height inversion in moderately high forest areas.

Key words: multi-baseline PolInSAR; forest height; baseline selection method; ECC method; PROD method

0 引言

森林高度是森林资源调查的主要因子。森林高度与森林生物量密切相关,是估算森林地上生物量所需的重要参数之一^[1],同时还是计算立木材积、监测林木长势和评价林分立地条件等森林经营活动的主要依据,为获取森林生产力和生物多样性提供必要的信息。

森林高度的测定有地面调查法、摄影测量法、激光雷达法等。目前极化 SAR 干涉测量(Polarimetric SAR interferometry, PolInSAR)和多基线层析 SAR 具有反演森林高度的潜力。多基线层析 SAR 是一种新兴技术,能够反演森林的 3D 垂直剖面,进而估算森林高度^[2-6]。PolInSAR 技术使用多种理论模型将森林的生物物理参数与雷达可观测量相关联反演森林高度^[7-20]。由于最高森林的可靠估计取决于可用的最短基线,最矮森林的可靠估计取决于可用的最长基线,因此单基线 PolInSAR 不能在森林高度变化大的区域准确地反演森林高度^[15],而多基线 PolInSAR 可以解决这一问题,但需要为每个像元选择合适的基线。

多基线 PolInSAR 数据集由多个不同飞行轨道获取的 PolSAR 数据组成。多基线 PolInSAR 反演森林高度需要数据对之间具有理想的基线,基线长度

取决于平台、目标几何、森林高度和森林垂直结构^[7, 15],并且垂直基线的长度决定了干涉测量相位差对不同高度散射体的敏感性^[19, 21]。对于给定的像元,某个基线比其他基线更能准确地反演森林高度,因此有必要为每个像元选择合适的基线,以提高森林高度反演的精度。文献[22-23]使用相干边界的偏心率(Eccentricity of the coherence boundary, ECC)选择基线,ECC 方法反演森林高度的精度相对传统单基线算法提高了 44.05%^[23]。文献[24]对 Mondah 森林的多基线 PolInSAR SLC 数据使用 PROD 方法选择合适的基线,其反演的森林高度与样地数据具有良好的一致性,平均偏差为 3.75 m。

本文数据作为 NASA/ESA “AfriSAR 活动”^[25-26]的一部分,是 JPL/NASA 于 2016 年在加蓬一些森林区域获取的无人驾驶飞行器合成孔径雷达(Uninhabited aerial vehicle synthetic aperture radar, UAVSAR)数据和陆地植被冰传感器(Land, vegetation and ice sensor, LVIS)雷达数据。该活动旨在校准和验证即将到来的星载数据,以研究森林在全球碳循环中的作用。

本文使用 JPL/NASA 在加蓬森林区域获得的 UAVSAR L 波段的多基线全极化 PolInSAR 数据反演森林高度,针对复相干未达到最大分离的问题,使用相干分离最大算法(Maximum coherence

difference,MCD)^[27]使复相干达到最大分离,改进 PROD 方法与 ECC 方法,对这两种方法进行对比分析,并使用激光雷达 LVIS RH100 数据验证反演的森林高度,解决单基线 PolInSAR 在森林高度变化大的区域误差大的问题,以探索效果更优的基线选择方法。

1 研究区域概况

刚果盆地的热带森林被称为地球的第二个肺,加蓬的森林区域是刚果盆地的一部分,加蓬的 Pongara 公园位于 9°10′~10°10′E、0°0.3′S~0°15′N,主要为红树林,并且地形相对平坦。本文使用

UAVSAR L 波段全极化 PolInSAR 数据集反演森林高度,并使用激光雷达数据 LVIS RH100 验证反演的森林高度。UAVSAR 是 JPL/NASA 开发的 L 波段重复轨道干涉测量的机载全极化 SAR 系统,飞行高度为 12.5 km,入射角的范围为 25°~60°不等。UAVSAR SLC 数据集的方位向分辨率为 0.6 m,距离向分辨率为 1.6 m^[28]。该数据的获取时间为 2016 年 2 月 27 日,轨道数为 5,其水平基线几乎为零,垂直基线不同(表 1)。使用 20:5 多视后,获得方位向分辨率为 12 m、距离向分辨率为 8 m 的多视图像。图 1 为研究区域主图像的 Pauli 基彩色合成图。

表 1 获取的研究区域 UAVSAR 数据
Tab.1 UAVSAR data acquired in study area

数据	获取时刻(起/止点)	垂直基线长度/m
pongar_TM275_16009_002_160227_L090_01_BC	12:30:11/12:36:13	
pongar_TM275_16009_003_160227_L090_01_BC	12:55:56/13:02:06	0
pongar_TM275_16009_004_160227_L090_01_BC	13:21:38/13:27:44	20
pongar_TM275_16009_005_160227_L090_01_BC	13:47:40/13:53:50	45
pongar_TM275_16009_006_160227_L090_01_BC	14:13:21/14:19:35	105

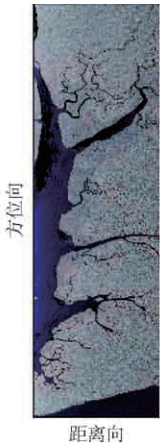


图 1 UAVSAR Pauli 图像
Fig.1 UAVSAR Pauli image

由于激光雷达不受 PolInSAR 误差源的影响,因此使用激光雷达获得的森林高度验证多基线 PolInSAR 反演森林高度的精度。激光雷达数据

是 NASA 提供的 LVIS 数据,LVIS 为中等足迹的激光雷达,足迹直径为 20 m,获取时间为 2016 年 3 月 4 日。LVIS L2 级数据包含完整波形数据以及许多相对高度(RH)指标,例如 RH100、RH95,这些指标代表激光雷达在地面上方接收到的反射幅度的百分比,RH100、RH95 分别表示 100%、95%。本文选取 LVIS L2 级数据中的 RH100 指标作为森林高度的验证数据(下文用 LVIS RH100 表示)。图 2 为研究区激光雷达获取的 LVIS RH100 数据。

2 研究方法

2.1 多基线 PolInSAR 的森林高度反演

对 UAVSAR 的 SLC 数据进行配准、光谱滤波和极化定标^[29]等预处理。假设满足互易性,以 Pauli 基散射矢量 k 形式表示 SLC 数据^[18-20]

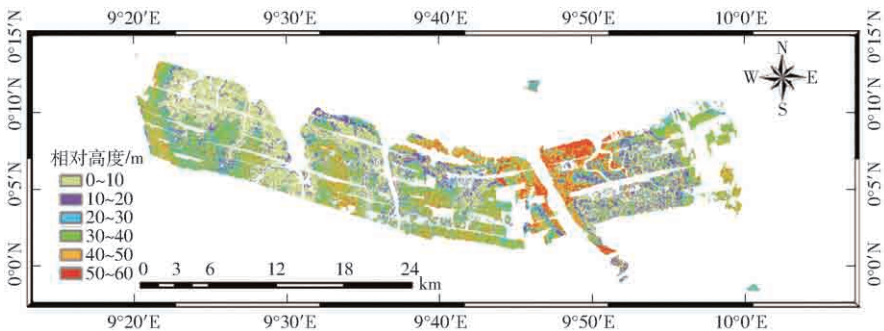


图 2 激光雷达获取的 LVIS RH100 数据
Fig.2 LVIS RH100 data acquired by LiDAR

$$\mathbf{k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{HH} + \mathbf{S}_{VV} & \mathbf{S}_{HH} - \mathbf{S}_{VV} & 2\mathbf{S}_{HV} \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

式中 $\mathbf{S}_{HH}$ ——HH 极化通道的 SLC 图像
 $\mathbf{S}_{VV}$ ——VV 极化通道的 SLC 图像
 $\mathbf{S}_{HV}$ ——HV 极化通道的 SLC 图像

对于具有 5 轨道的 PolInSAR 数据集的散射矢量为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_1 \\ \mathbf{k}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{k}_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{k}_m$ ——轨道 m 的散射矢量
 $\mathbf{K}$ ——多轨道散射矢量

为了计算相干性,使用估计协方差矩阵 $\mathbf{T}$ 来表示散射矢量的二阶统计量^[19]

$$\mathbf{T} = \langle \mathbf{K} \mathbf{K}^H \rangle \quad (3)$$

式中 $\mathbf{H}$ ——复共轭的转置
 $\langle \rangle$ ——空间平均或多视

多基线 PolInSAR 数据的矩阵 $\mathbf{T}_{MB}$ 为^[10]

$$\mathbf{T}_{MB} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_1 & \boldsymbol{\Omega}_{1,2} & \cdots & \boldsymbol{\Omega}_{1,m-1} & \boldsymbol{\Omega}_{1,m} \\ \boldsymbol{\Omega}_{1,2}^H & \mathbf{T}_2 & \cdots & \boldsymbol{\Omega}_{2,m-1} & \boldsymbol{\Omega}_{2,m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \boldsymbol{\Omega}_{1,m-1}^H & \boldsymbol{\Omega}_{2,m-1}^H & \cdots & \mathbf{T}_{m-1} & \boldsymbol{\Omega}_{m-1,m} \\ \boldsymbol{\Omega}_{1,m}^H & \boldsymbol{\Omega}_{2,m}^H & \cdots & \boldsymbol{\Omega}_{m-1,m}^H & \mathbf{T}_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 $\mathbf{T}_{MB}$ ——多基线协方差(或相干)矩阵
 $\mathbf{T}_m$ ——轨道 m 的极化协方差矩阵(3×3)
 $\boldsymbol{\Omega}_{m-1,m}$ ——参考轨道 $m-1$ 与轨道 m 的极化干涉协方差矩阵(3×3)

任意基线的复相干 γ 估计公式^[19,30]如下

$$\gamma = \frac{\boldsymbol{\omega}^H \boldsymbol{\Omega}_{m,n} \boldsymbol{\omega}}{\sqrt{(\boldsymbol{\omega}^H \mathbf{T}_m \boldsymbol{\omega})(\boldsymbol{\omega}^H \mathbf{T}_n \boldsymbol{\omega})}} \quad (5)$$

式中 $\boldsymbol{\omega}$ ——极化权重向量
 $\boldsymbol{\Omega}_{m,n}$ ——参考轨道 m 与轨道 n 的极化干涉协方差矩阵(3×3)
 $\mathbf{T}_n$ ——轨道 n 的极化协方差矩阵(3×3)

本文基于地面随机体散射(Random volume over ground, RVoG)模型使用三阶段反演法^[7,14-18]反演森林高度。

2.2 多基线 PolInSAR 的基线选择方法

PolInSAR 相干区域形状是预测森林高度反演性能的关键指标^[27,31-33],本文选取 ecc 与 prod 两个指标衡量多基线 PolInSAR 相干区域的形状,为多基线 PolInSAR 数据选择合适的基线,分别称为 ECC 方法与 PROD 方法。针对已有研究使用相位分离最大优化算法^[24]未使复相干达到最大分离的问题,本

文使用 MCD^[27,34]使复相干达到最大分离,改进 PROD 与 ECC 方法,并详细地对比分析这两种基线选择方法。

2.2.1 ECC 方法

使用相干边界的偏心率来选择基线^[22-23],计算公式为

$$e_{cc} = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} \quad (6)$$

式中 a ——相干区域的长轴长
 b ——相干区域的短轴长
 e_{cc} ——相干边界的偏心率

假设相干区域是椭圆, a 等于 $|\gamma_{high} - \gamma_{low}|$,其中 γ_{high} 为与森林冠层散射矢量相对应的冠层散射复相干, γ_{low} 是与地面散射矢量相对应的地面散射复相干。而 b 等于相干区域边界上两个相对点之间的最小距离; e_{cc} 的范围为 0~1, e_{cc} 的值越大,相干区域的短轴长和长轴长的比率越小,观测的相干区域越符合 RVoG 模型的直线假设^[33]。

2.2.2 PROD 方法

ECC 方法只考虑了相干区域的偏心率,BABU 等^[24]进一步使用相干区域的长轴与相干区域中心幅度 $|\gamma_{high} + \gamma_{low}|$ 的乘积来选择基线:该方法优先选出复相干之间具有最大分离的基线(分离越大,越符合 RVoG 模型的直线假设),同时也在整体上保持高的复相干幅度(时间去相干最小)。PROD 方法是对文献[25]方法的简化,计算方法简单,并且在测试中产生了类似的结果^[24],计算公式为

$$p_{rod} = |\gamma_{high} - \gamma_{low}| |\gamma_{high} + \gamma_{low}| \quad (7)$$

选择 p_{rod} 值最大的基线作为每个像元的合适基线,这有利于选择复相干分离大和整体复相干幅度高的基线。

3 结果与分析

本文应用两种基线选择方法为每个像元选择合适的基线,同时使用 MCD 所对应的复相干来反演森林高度。图 3 为反演的森林高度图,图 4 为与 LVIS RH100 森林高度相比,获得的森林高度误差(两种基线方法反演的森林高度减去 LVIS RH100 森林高度)。图 5 为森林高度误差的统计图。

由图 3 可知,两种基线选择方法反演的森林高度具有良好的一致性;与 LVIS RH100 相比,两种基线选择方法反演的森林高度的误差也具有良好的一致性(图 4)。由图 3 与图 4 可看出,低矮与高大森林区域的误差较大,且低估了高大森林(误差为负值),高估了低矮森林(误差为正值);同时,ECC 方法低估或高估森林高度的程度比 PROD 方法大,精

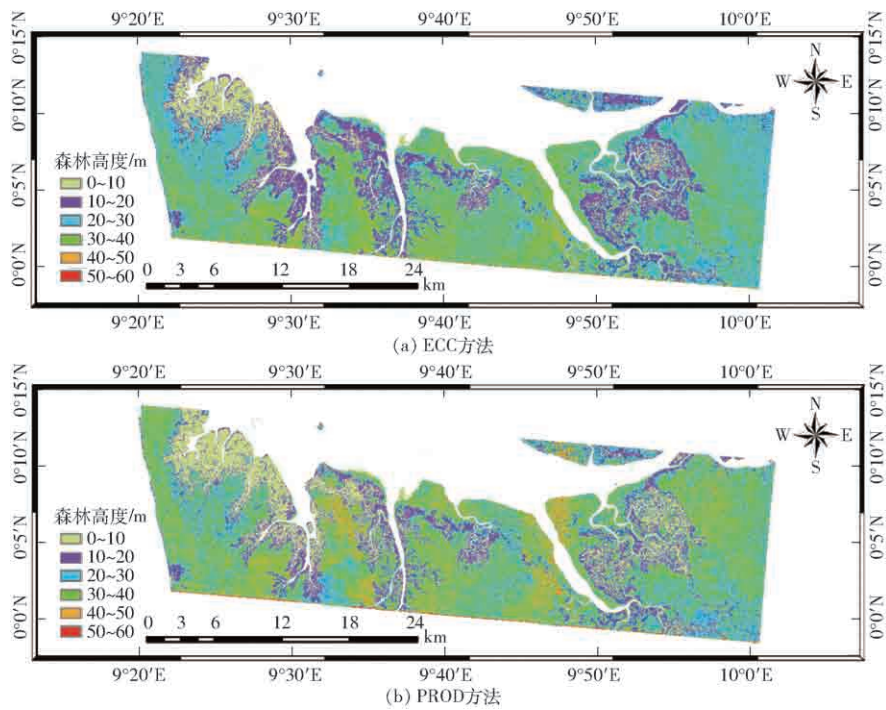


图 3 两种方法反演的森林高度图

Fig. 3 Forest height maps inverted by two baseline selection methods

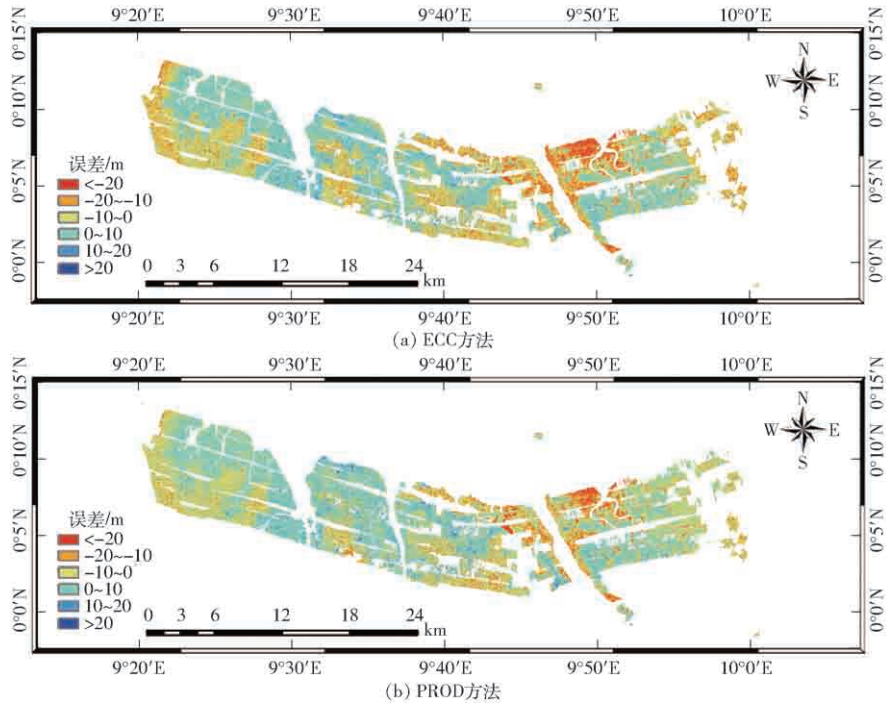


图 4 两种方法反演的森林高度误差图

Fig. 4 Forest height error maps inverted by two baseline selection methods (difference between forest height and LVIS RH100)

度低于 PROD 方法(图 5)。

图 6 为森林高度与 LVIS RH100 的密度图。图中包含 LVIS RH100 大于 3 m 时的 592 460 个样本点,红色实线是 $y = x$,黑色虚线是拟合的线性方程。两种基线选择方法都存在高估低矮森林,以及低估高大森林的现象,与图 3 ~ 5 的分析一致。图 6a 中拟合的线性方程为 $y = 0.50x + 10.60$, $R^2 = 0.69$ 。图 6b 中拟合的方程为 $y = 0.63x + 8.21$, $R^2 = 0.70$ 。

以 LVIS RH100 作为验证数据,ECC 方法的均方根误差 RMSE 为 9.80 m,PROD 方法的 RMSE 为 8.86 m,比 ECC 方法精度提高了 9.63%。总体来说,PROD 方法反演结果更接近 LVIS RH100 的森林高度,结果更优。

图 7 为两种基线选择方法对应的冠层复相干幅度与地面复相干幅度的密度图。ECC 方法拟合的直线方程为 $y = 0.94x + 0.04$, $R^2 = 0.93$;PROD 方法

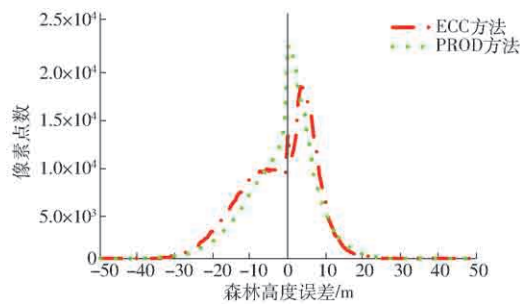


图 5 森林高度误差统计图

Fig. 5 Statistical histogram of forest height error

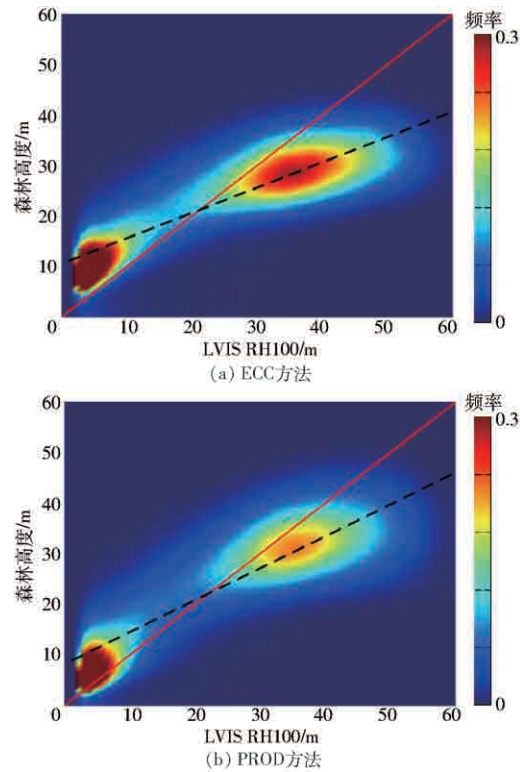


图 6 森林高度与 LVIS RH100 的密度图

Fig. 6 Density map of forest height and LVIS RH100

拟合的直线方程为 $y = 0.84x + 0.11$, $R^2 = 0.80$ 。表明 PROD 方法冠层复相干幅度与地面复相干幅度的差异大于 ECC 方法。由于地面复相干幅度与冠层复相干幅度之间的差异很小^[24],因此只绘制两种基线选择方法对应的冠层复相干幅度与 LVIS RH100 的密度图(图 8)。由图 7 与图 8 可知,低矮森林的复相干幅度较大,高大森林的复相干幅度较小,随着森林高度的增加,复相干幅度减小^[7, 35]。PROD 方法在高大森林区域选择的复相干幅度大于 ECC 方法,但在低矮森林区域选择的复相干幅度小于 ECC 方法。复相干幅度对反演森林高度的精度有一定的影响。

为了详细分析比较两种基线选择方法的性能,在 $[3, 10)$ 、 $[20, 30)$ 、 $[50, 60)$ m 区间内分别选取 LVIS RH100 为 6.71、21.90、54.02 m 的像元表示低矮、中等高度、高大森林区域,且绘制复单位圆内两种基线选择方法对应的复相干,如图 9 所示。其中,

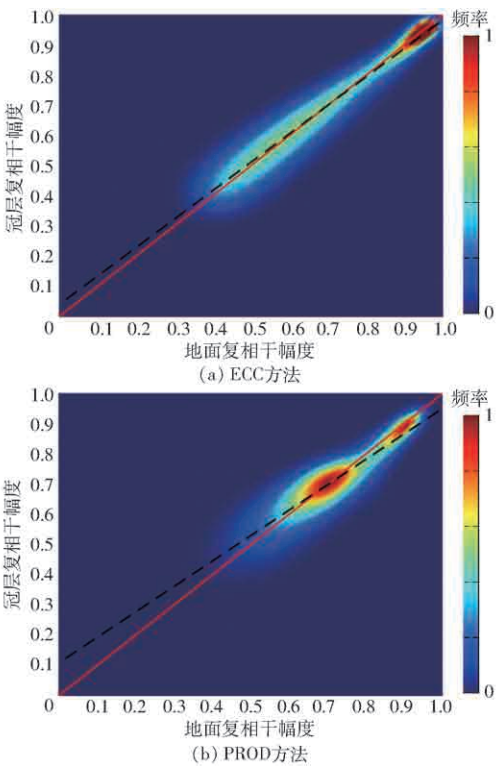


图 7 基线选择方法对应的冠层复相干幅度与地面复相干幅度的密度图

Fig. 7 Density map of canopy complex coherence amplitude and ground complex coherence amplitude map corresponding to baseline selection method

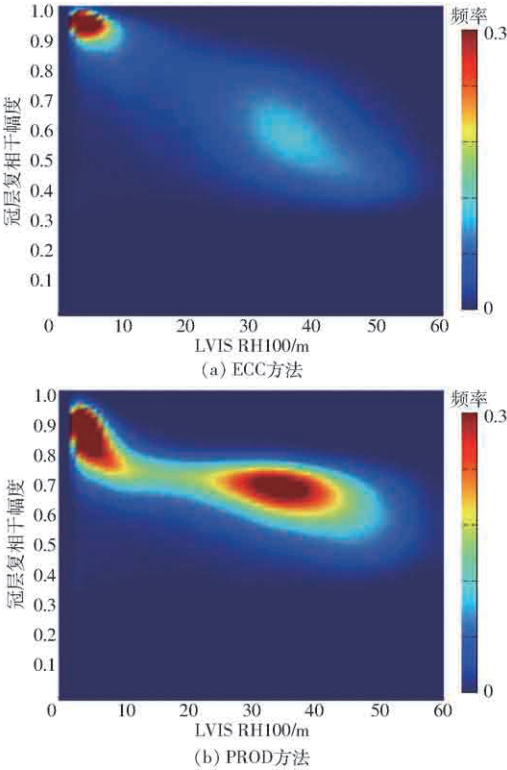


图 8 基线选择方法对应的冠层复相干幅度与 LVIS RH100 的密度图

Fig. 8 Density maps of canopy complex coherence amplitude corresponding to baseline selection method and LVIS RH100

MCD 高表示使用 MCD 方法获取的与冠层散射对应的复相干,MCD 低表示使用 MCD 方法获取的与地面散射对应的复相干。由图 9a、9b 可知,低矮森林的复相干相对集中且复相干幅度大^[7,23,35],虽然 ECC 方法对应的复相干幅度与线性程度优于 PROD 方法,但其复相干的相干分离程度低于 PROD 方法,因此可得 PROD 方法反演森林高度的误差小;由图 9e、9f 可知,高大森林的复相干幅度减小^[6-7,35],与 ECC 方法相比,PROD 方法不仅使其复相干幅度变大,也使复相干的相干分离程度优于 ECC 方法,因此可得 PROD 方法反演森林高度的误差小。由图 9c、9d 可知,中等高度的森林区域,复相干的相干分离程度与相干幅度介于低矮森林与高大森林之间,线性程度是影响反演森林高度的主要因素,PROD 方法综合考虑复相干的相干分离程度与相干幅度,虽然使复相干幅度增大,但同时使复相干的相干分离程度低于 ECC 方法,因此可得 ECC 方法反演森林高度的误差小^[23]。

4 讨论

为了更准确地比较分析两种基线选择方法,列出以 10 m 为间隔的分段森林高度的 RMSE(表 2);ECC 方法在区间[10,20)、[20,30) m 反演森林高度的均方根误差(RMSE)小于 PROD 方法,但在区间[3,10)、[30,40)、[40,50)、[50,60) m 反演森林高度的 RMSE 大于 PROD 方法。

为了直接评估 ECC 方法与 PROD 方法基线选择的差异,本文给出两种基线选择方法对应的垂直

波数 k_z 与 LVIS RH100 的密度图,如图 10 所示。 h 的计算公式为

$$h = \frac{\varphi}{k_z} \tag{8}$$

其中

$$k_z = \frac{4\pi\Delta\theta}{\lambda\sin\theta} \approx \frac{4\pi B_n}{\lambda H \tan\theta} \tag{9}$$

- 式中 h ——森林高度
 φ ——相干相位
 $\Delta\theta$ ——主辅 SAR 图像的入射角之差
 θ ——平均入射角
 B_n ——垂直基线
 H ——传感器高度
 λ ——传感器波长

为了更准确地反演森林高度,高大森林应尽可能使 k_z 较小,即为较短基线,低矮森林应尽可能使 k_z 较大(较长的基线)。根据以上分析,PROD 方法所选择的 k_z 更能准确地反演森林高度。根据式(8),令 φ 固定,当选择的 k_z 小于合适的基线对应的 k_z 时,导致森林高度被高估,当选择的 k_z 大于合适的基线对应的 k_z 时,导致森林高度被低估。在低矮森林区域(LVIS RH100 小于 10 m),ECC 方法选取的 k_z 大部分都较小,且小于 PROD 方法选取值;进一步说明了低矮森林区域被高估,且说明了 ECC 方法反演的森林高度高估的程度比 PROD 方法严重的原因。当 LVIS RH100 大于 30 m 时,ECC 方法选择的 k_z 开始增大,PROD 方法选择的 k_z 减小,进一步说明了对高大森林区域产生低估,且说明了 ECC 方法低估程度更严重的原因。

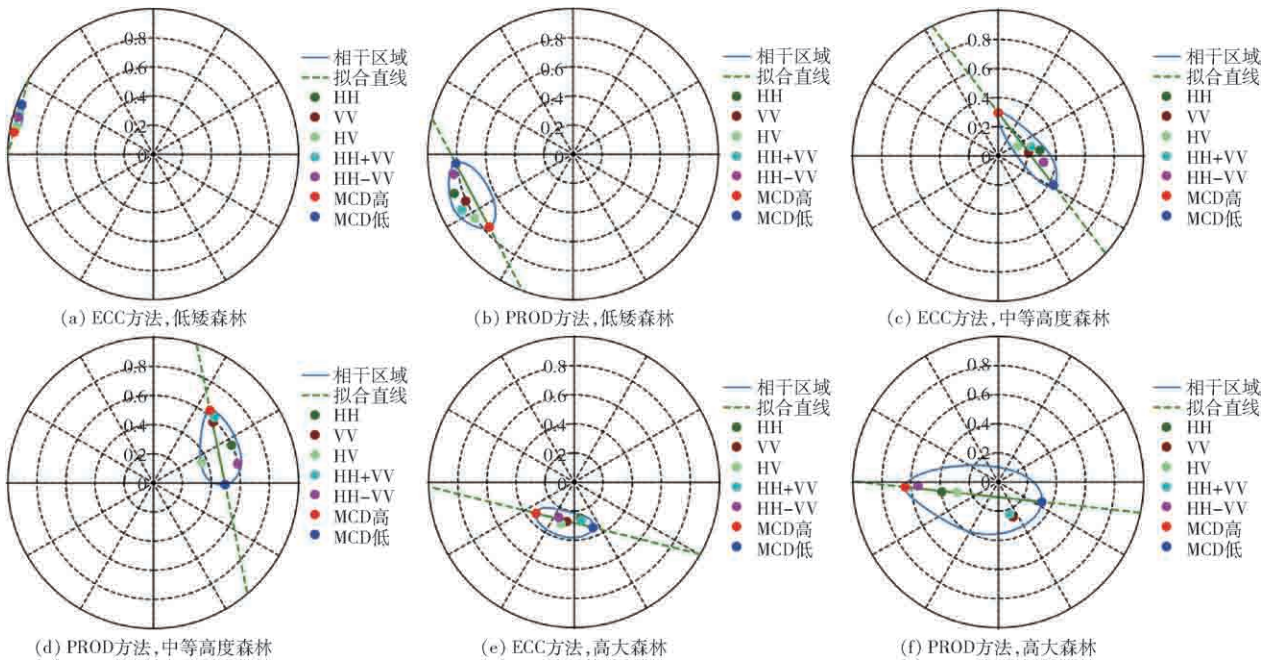


图 9 复单位圆内基线选择方法对应的复相干

Fig. 9 Coherence maps corresponding to baseline selection method in complex plane

表 2 研究区森林高度的 RMSE

Tab. 2 RMSE with forest height in study area

LVIS RH100/m	像元总数	RMSE/m	
		ECC	PROD
[3,10)	158 967	7. 16	5. 88
[10,20)	66 133	7. 72	8. 45
[20,30)	86 863	5. 99	7. 27
[30,40)	149 243	7. 88	6. 89
[40,50)	103 437	13. 85	11. 75
[50,60)	27 817	21. 12	19. 10

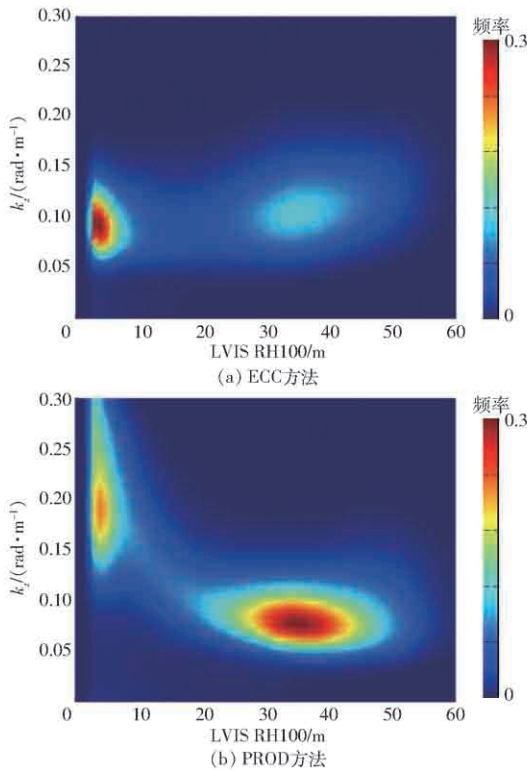


图 10 基线选择方法对应 k_z 与 LVIS RH100 的密度图
Fig. 10 Density maps of k_z corresponding to baseline selection method and LVIS RH100

为了验证两种基线方法的适用性,将其应用于加蓬的 Lope 区域,分段森林高度的 RMSE 如表 3 所示。ECC 方法在区间[10,20)、[20,30) m 反演森林高

表 3 研究区 Lope 森林高度的 RMSE

Tab. 3 RMSE with forest height in study area of Lope

LVIS RH100/m	像元总数	RMSE/m	
		ECC	PROD
[3,10)	76 319	8. 41	7. 66
[10,20)	16 972	7. 40	8. 35
[20,30)	27 995	9. 51	9. 61
[30,40)	108 911	17. 01	15. 00
[40,50)	182 194	24. 23	21. 32
[50,60)	30 516	33. 23	30. 11

度的 RMSE 小于 PROD 方法,但在区间[3,10)、[30,40)、[40,50)、[50,60) m 反演森林高度的 RMSE 大于 PROD 方法,与 Pongara 区域获得的结果一致。

由表 2、3 可知,ECC 方法在区间[10,20)、[20,30) m 反演森林高度的精度优于 PROD 方法,但在区间[3,10)、[30,40)、[40,50)、[50,60) m 反演森林高度的精度低于 PROD 方法。分析原因可能在于:低矮森林区域,由于 L 波段能穿透森林到达地面,各极化通道的复相干无法有效分离且复相干幅度大^[23],高大森林区域,随着植被高度的增加,加上其他去相干因素,体散射复相干减小且达到饱和,不同极化通道的复相干相对集中^[6-7, 35]。这两种情况下,复相干幅度与复相干的相干分离程度是影响反演森林高度的主要因素,虽然 ECC 方法的直线拟合效果优于 PROD 方法,但由于其不能使复相干达到最大分离,且 PROD 方法综合考虑复相干的相干分离程度与相干幅度,因此 PROD 方法反演的森林高度的精度高于 ECC 方法。中等高度的森林区域(高度在 10~30 m 之间),复单位圆内的复相干相对分散,复相干幅度也未达到饱和,相干区域的直线拟合效果是影响反演森林高度的主要因素,虽然 PROD 方法可使复相干幅度增大,但复相干的相干分离程度低于 ECC 方法,因此 ECC 方法反演森林高度的精度高于 PROD 方法。

低矮与高大森林的区域,复相干的相干分离程度或复相干幅度较小时,复相干的相干分离程度与复相干幅度是影响反演森林高度的主要因素,PROD 方法比 ECC 方法更适用于反演低矮与高大森林。中等高度的森林区域,复相干较为分散,复相干幅度未达到饱和时,相干区域的直线拟合效果是影响反演森林高度的主要因素,ECC 方法比 PROD 方法更适用于反演中等高度的森林。

5 结论

(1)两种基线选择方法反演的森林高度与 LVIS RH100 相一致。ECC 方法将相干区域的线性程度作为判断标准,PROD 方法综合考虑了复相干的相干分离程度(相干直线的拟合效果)与相干幅度,在一定程度上解决了 ECC 方法低估高大森林与高估低矮森林的问题。PROD 方法森林高度反演的精度高于 ECC 方法,精度比 ECC 方法提高了 9.63%。
(2)PROD 方法更适用于反演低矮与高大森林,ECC 方法更适用于反演中等高度的森林。

参 考 文 献

[1] ZAKI N A M, LATIF Z A, SURATMAN M N. Modelling above-ground live trees biomass and carbon stock estimation of tropical

- lowland dipterocarp forest: integration of field-based and remotely sensed estimates [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(8): 2312 – 2340.
- [2] REIGBER A, MOREIRA A. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2142 – 2152.
- [3] TEBALDINI S, ROCCA F. Multibaseline polarimetric SAR tomography of a boreal forest at P and L bands [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2012, 50(1): 232 – 246.
- [4] LI X, LIANG L, GUO H, et al. Compressive sensing for multibaseline polarimetric SAR tomography of forested areas [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2015, 53(1): 153 – 166.
- [5] KUMAR S, JOSHI S K, GOVIL H. Spaceborne polSAR tomography for forest height retrieval [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(12): 5175 – 5185.
- [6] HUANG Y, FERRO-FAMIL L, REIGBER A. Under-foilage object imaging using SAR tomography and polarimetric spectral estimators [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(6): 2213 – 2225.
- [7] CLOUDE S R, PAPATHANASSIOU K P. Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry [J]. *IEEE Proc-Radar Sonar and Navigation*, 2003, 150(3): 125 – 134.
- [8] GARESTIER F, DUBOIS-FERNANDEZ P C, CHAMPION I. Forest height inversion using high-resolution P-band Pol-InSAR data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2008, 46(11): 3544 – 3559.
- [9] GARESTIER F, DUBOIS-FERNANDEZ P C. Pine forest height inversion using single-pass X-band PolInSAR data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2007, 45(1): 59 – 68.
- [10] NEUMANN M, FERROFAMIL L, REIGBER A. Estimation of forest structure, ground, and canopy layer characteristics from multibaseline polarimetric interferometric SAR data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1086 – 1104.
- [11] LEE S K, KUGLER F, PAPATHANASSIOU K P, et al. Quantification of temporal decorrelation effects at L-band for polarimetric SAR interferometry applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2013, 6(3): 1351 – 1367.
- [12] 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.
- [13] LEE S K, FATOYINBO T E. TanDEM – X Pol – InSAR inversion for mangrove canopy height estimation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2017, 8(7): 3608 – 3618.
- [14] 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.
- [15] KUGLER 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] PAPATHANASSIOU K P, CLOUDE S R. Single-baseline polarimetric SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(11): 2352 – 2363.
- [19] CLOUDE S R, PAPATHANASSIOU K P. Polarimetric SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(5): 1551 – 1565.
- [20] KUMAR S, KHATI U G, CHANDOLA S, et al. Polarimetric SAR interferometry based modeling for tree height and aboveground biomass retrieval in a tropical deciduous forest [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(3): 571 – 586.
- [21] ROSEN P A, HENSLEY S, JOUGHIN I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2002, 88(3): 333 – 382.
- [22] LEE S K, KUGLER F, PAPATHANASSIOU K, et al. Multibaseline polarimetric SAR interferometry forest height inversion approaches [C] // *ESA Polinsar Workshop*, 2011:1 – 7.
- [23] 张兵, 朱建军, 付海强, 等. 多基线极化干涉 SAR 植被高度反演方法 [J]. *测绘工程*, 2017, 26(9): 23 – 27, 31.
ZHANG Bing, ZHU Jianjun, FU Haiqiang, et al. Multi-baselines PolInSAR vegetation height inversion method [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2017, 26(9): 23 – 27, 31. (in Chinese)
- [24] BABU A, KUMAR S. Tree canopy height estimation using multi baseline RVOG inversion technique [J]. *Int Arch Photogramm Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 2018, XLII – 5: 605 – 611.
- [25] LAVALLE M, SHIROMA G, HENSLEY S, et al. First results of vegetation height retrieval from the 2016 UAVSAR AfriSAR campaign [C] // *ESA PolInSAR Workshop*, 2017:1 – 19.
- [26] DUBOIS-FERNANDEZ P, DUPUIS X, CAPDESSUS P, et al. Preliminary results of the AfriSAR campaign [C] // *Eusar: European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2016:1 – 3.

- [27] FLYNN T, TABB M, CARANDE R. Coherence region shape extraction for vegetation parameter estimation in polarimetric SAR interferometry [C]//IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, 2002:1-3.
- [28] ROSEN P A, HENSLEY S, WHEELER K, et al. UAVSAR: new NASA airborne SAR system for research[J]. Aerospace & Electronic Systems Magazine IEEE, 2007, 22(11): 21-28.
- [29] FORE A G, CHAPMAN B D, HAWKINS B P, et al. UAVSAR polarimetric calibration [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2015, 53(6): 3481-3491.
- [30] KUMAR S, RAGHAVENDRA S, JENIA S, et al. Spaceborne PolInSAR and ground-based TLS data modeling for characterization of forest structural and biophysical parameters [J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2018.
- [31] TABB M, ORREY J, FLYNN T, et al. Phase diversity: a decomposition for vegetation parameter estimation using polarimetric SAR interferometry [C]//Fourth European Synthetic Aperture RADAR Conference, 2002: 721-724.
- [32] YI C, YAMAGUCHI Y, YAMADA H, et al. PolInSAR coherence region modeling and inversion: the best normal matrix approximation solution [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2014, 52(2): 1048-1060.
- [33] LOPEZ-MARTINEZ C, ALONSO-GONZALEZ A. Assessment and estimation of the RVoG model in polarimetric SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(6): 3091-3106.
- [34] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 220-229. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181025&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.025. (in Chinese)
- [35] 罗环敏, 陈尔学, 程建, 等. 极化干涉 SAR 森林高度反演方法研究[J]. 遥感学报, 2010, 14(4): 806-821. LUO Huanmin, CHEN Erxue, CHENG Jian, et al. Forest height estimation methods using polarimetric SAR interferometry [J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(4): 806-821. (in Chinese)

(上接第 150 页)

- [15] ELTNER A, BAUMGART P, MAAS H G, et al. Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 40(6): 741-755.
- [16] 吴淑芳, 刘勃洋, 雷琪, 等. 基于三维重建技术的坡面细沟侵蚀演变过程研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 114-120. WU Shufang, LIU Boyang, LEI Qi, et al. Evolution process of slope rill erosion based on 3D photo reconstruction technique [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 114-120. (in Chinese)
- [17] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features[J]. ICCV, 1999, 99(2): 1150-1157.
- [18] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.
- [19] GRANSHAW S I. Bundle adjustment methods in engineering photogrammetry [J]. The Photogrammetric Record, 1980, 10(56): 181-207.
- [20] JAMES M R, ROBSON S, D'OLEIRE-OLTMANN S, et al. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: ground control quality, quantity and bundle adjustment[J]. Geomorphology, 2017, 280: 51-66.
- [21] JAMES M R, ROBSON S. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2014, 39(10): 1413-1420.
- [22] GRANSHAW S I. Close range photogrammetry: principles, methods and applications [J]. The Photogrammetric Record, 2010, 25(130): 203-204.
- [23] FETIC A, JURIC D, OSMANKOVIC D. The procedure of a camera calibration using Camera Calibration Toolbox for Matlab [C]//Proceedings of the 35th International Convention MIPRO. IEEE, 2012.
- [24] WHEATON J M, BRASINGTON J, DARBY S E, et al. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(2): 136-156.
- [25] 张科利, 秋吉康宏. 坡面细沟侵蚀发生的临界水力条件研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 41-46. ZHANG Keli, AKIYOSHI Yasuhiro. Critical hydraulic condition of rill erosion on sloping surface [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1998, 4(1): 41-46. (in Chinese)
- [26] STUMPF A, MALET J P, ALLEMAND P, et al. Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion[J]. Geomorphology, 2015, 231: 130-145.