doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.025

单基线 PolInSAR 森林高度反演方法研究

张建双　范文义　毛学刚　于　颖
(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 极化干涉 SAR(Polarimetric SAR interferometry, PolInSAR)森林高度反演是当前雷达遥感领域的研究热点,近年来出现了多种单基线 PolInSAR 森林高度反演方法。为了给单基线 PolInSAR 反演森林高度的算法提供基础,并探索和发展效果更优的反演方法,使用 PolSARpro 软件模拟森林平均高度为 18 m 的 L 波段(L = 23 cm)全极化干涉 SAR 数据,研究了森林高度反演算法中的 DEM 差分法、RVoG 法、复相干幅度反演法、混合反演法,并基于相干优化法对混合反演法进行了改进;为了更准确地对算法的性能进行比较,给出方位向为 48 bin 时各算法的距离向剖面的对比图,并选取图像的中间区域,对森林高度位于 3 ~ 30 m 的 1 104 个样本点,应用均值和均方根误差 RSME 对 5 种方法模拟的 18 m 森林高度进行比较。结果表明:森林高度平均值反演结果由大到小依次为:复相干幅度反演法、混合反演法、改进的混合反演法、RVoG 法、DEM 差分法,分别为 19.40、18.31、18.12、10.55、10.05 m,均方根误差(RMSE)由小到大依次为:改进的混合反演法、混合反演法、复相干幅度反演法、RVoG 法、DEM 差分法,分别为 1.06、1.48、3.49、7.51、8.04 m;说明 DEM 差分法与 RVoG 法反演的森林高度存在明显低估,复相干反演法出现明显高估且其离散程度最大,混合反演法和改进的混合反演法与真实值的误差分别为 0.31、0.12 m,改进的混合反演法与真实值的相差最小,离散程度最小,均方根误差最小,反演结果最优。改进的混合反演法综合了混合反演法与相干优化法的优点,使其估计的地形相位的均方根误差最小(0.045 rad),森林高度与真实值的误差最小,均方根误差最小,并且具有一定的鲁棒性。

关键词: 单基线森林高度反演; DEM 差分法; RVoG 法; 复相干幅度反演法; 混合反演法; 相干优化法
中图分类号: S758.5⁺4; TP79　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)10-0220-10

Comparison of Five Methods to Inverse Forest Height from Single-baseline PolInSAR Data

ZHANG Jianshuang　FAN Wenyi　MAO Xuegang　YU Ying
(*School of Forestry*, *Northeast Forestry University*, *Harbin* 150040, *China*)

Abstract: To provide the basis for the methods of vegetation height inversion by using single-baseline PolInSAR SAR data and explore a more effective inversion method, the European Space Agency (ESA) Toolbox PolSARPro was used to simulate L-band (L = 23 cm) PolInSAR SAR data with an average vegetation height of 18 m. The DEM difference, RVoG, SINC, Hybrid, and Hybrid method were studied based on coherent optimization. The vegetation height ranged from 3m to 30m was analyzed with 1104 sample points in the middle region of the image. Giving a 3D image, range profile image with azimuth of 48 and statistical image of vegetation height and topographic phase were used to compare the performance of five methods. Compared with the real value of 18 m, the descending order of vegetation height means was SINC, Hybrid, improved Hybrid, RVoG and DEM difference method. The difference between the improved Hybrid inversion method and the real value was the smallest as 0.12 m, smaller than Hybrid of 0.31 m. RMSE of the improved Hybrid, Hybrid, SINC, RVoG and DEM difference was 1.06 m, 1.48 m, 3.49 m, 7.51 m and 8.04 m, respectively. The vegetation height of the improved Hybrid method had the smallest difference and RMSE. The estimated topographic phase average value of the improved Hybrid, RVoG/Hybrid and DEM difference method was −0.018 rad, 0.011 rad and 0.1 rad;

收稿日期: 2018-04-20　修回日期: 2018-07-03
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(2572018BA02)
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

RMSE was 0.045 rad, 0.054 rad and 0.15 rad; and mean value of absolute value was 0.03 rad, 0.04 rad, and 0.1 rad, respectively. The topographic phase of the improved Hybrid method was approximately the closest to the simulated and had the smallest RMSE and the mean of absolute value. Improved Hybrid inversion method produced the best result among the five methods, combining the merits of Hybrid with the coherent optimization, with the smallest difference between real value and RMSE of vegetation height and topographic phase. The Hybrid method was improved based on the coherent optimization and the accuracy of vegetation height was analyzed with the ground phase estimation results to compare the five methods.

Key words: single-baseline forest height inversion; DEM difference; RVoG; SINC; Hybrid; coherent optimization

0　引言

森林高度是重要的森林生物物理参数之一，是评价立地质量与林木生长状况的重要依据[1]，并可以通过特定的异速生长方程来估计地上生物量[2]，对于估算森林地上生物量、森林生产力和预测生物多样性均有重要作用；森林高度空间分布信息对于森林资源管理、森林生物量的估测、区域和全球碳循环的研究具有重要意义[3]。

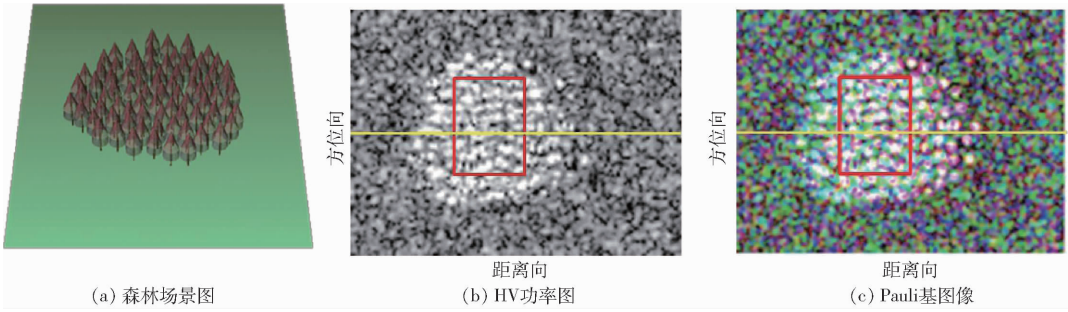
在众多森林高度反演方法中，极化干涉 SAR（Polarimetric SAR interferometry，PolInSAR）测量方法组合了干涉和极化的优点[4]，不仅可以提高地形的准确性测量，也能获得与散射机制有关的物理参数[5-8]。CLOUDE 和 PAPATHANASSIOUS[9] 首先提出极化干涉的概念，并将地面随机体散射模型（Random volume over ground，RVoG）扩展到全极化干涉 SAR，为 PolInSAR 森林高度的反演奠定了基础。文献[8，10-12]在 RVoG 模型基础上，验证了极化干涉复相关可能与地面散射状况有关，而与极化方式无关。由于六维非线性参数方法[13]的计算复杂度较高，CLOUDE 等[14]基于 RVoG 模型的三阶段法对 PolInSAR 森林高度反演过程进行了简化。针对三阶段算法的相干无法有效分离或地形问题，文献[6，15-19]先后对其进行了改进，提高了森林高度反演的精度。CLOUDE[20] 提出干涉相干幅度与相位差混合模型（HYBRID），其综合了相干幅度与相位的优势，获得了较高的估测精度。MINH 等[21]采用一种新奇的基于协方差矩阵分解的混合反演算法，实现了对仿真与 SIR-C/X-SAR 数据的森林植被参数反演。李新武等[22-23]又提出一种 C/L 波段联合反演算法，将旋转不变技术估计信号参数（Estimating signal parameters via rotation invariance techniques，ESPRIT）与三阶段法混合起来，分别获得更加准确的冠层相位与地形相位，高精确地反演了森林高度；同时表明 P/X 波段将使森林高度反演的准确性显著提高。干涉相干在很大程度上影响 PolInSAR 估计森林高度的结果，HASHJIN 等[24]采用一种快速直接的方法来选择窗口大小获取复相干。LAVALLE 等[25]研究了森林高度对 L 波段极化干涉相干的依赖性，并且比较了相位差最大化和相干区域边界上的幅度差最大化的方法。NEUMMANN 等[26]提出二分量极化干涉森林参数反演模型，并采用 Nelder-Mead 单纯形优化方法，提高森林高度反演精度。文献[27-29]对目前几种可用的森林高度反演方法进行比较，结果表明：DEM 差分法往往产生低估；RVoG 法与 DEM 差分法相比，有所改进，但依然出现低估；复相干幅度反演法由于非体散射去相干的影响，出现高估现象，但因忽略了相干相位，当遇到较低矮的森林时，将会低估植被高度；混合反演法综合了相干幅度与相位的优势，可得到较高的估测精度，并且混合反演法的性能取决于所选的冠层散射和地面散射对应的复相干，但通常情况下，由于冠层散射与地面散射对应的复相干并未达到最大分离，有必要使用相干优化方法获得更好的与冠层散射和地面散射相对应的复相干来提高森林高度反演精度。罗环敏等[28]进一步将相位分离最大算法的相干优化运用到混合反演法中，得到了总体效果最优的反演结果。

本文在分析已有森林高度反演算法的基础上，针对混合反演法中相干未达到最大分离的问题，根据极化信号和森林植被相互作用的物理机制，基于相干优化[9，30-33]方法中的相干分离最大算法[30]使地面散射和冠层散射对应的复相干在复平面内具有最大间隔，对混合反演法进行改进，与其他 4 种反演方法进行比较，并对影响森林高度的地形相位进行分析，为选取基于单基线 PolInSAR 反演森林高度的算法提供基础，以探索和发展效果更优的反演方法。

1　试验数据

由于多基线层析数据难以获取，原理复杂，计算量大且需要大量时间，同时获取森林地区的机载

SAR 图像也比较困难,而 ESA 的 PolSARpro 软件的模拟数据基于麦斯威尔方程的波的传播与散射模型,不用考虑时间去相关、运动或配准误差和信噪比效应的影响[14],因此采用其模拟 L 波段($L=23$ cm)的单基线的全极化干涉 SAR 数据。设置参数如下:地距向和方位向的坡度都为 0,不用考虑地形对森林高度反演的影响;雷达平台高度 3 000 m,水平基线 10 m,垂直基线 1 m,入射角为 45°,中心频率为 1.3 GHz,方位分辨率为 1.5 m,斜距分辨率 1.060 7 m,森林类型为针叶林,森林高度的平均值是 18 m,由于垂直波数与森林高度的乘积小于 2π,因此不存在森林高度反演的模糊问题[34]。图 1 为该场景对应的图像,中间区域为高 18 m 的森林覆盖区域,其他区域为非森林覆盖的地表。



(a) 森林场景图 (b) HV功率图 (c) Pauli基图像

图 1 仿真的森林场景图像

Fig. 1 Images of simulate forest scene

2 研究方法

在已有的森林高度反演算法(DEM 差分法、RVoG 法、复相干幅度反演法(SINC)、混合反演法)[9,27-28,35-37]的基础上,在小基线的情况下,针对混合反演法中相干未达到最大分离的问题,基于 FLYNN 等[30]提出的相干分离最大算法改进了混合反演法。本文的技术路线图如图 2 所示。

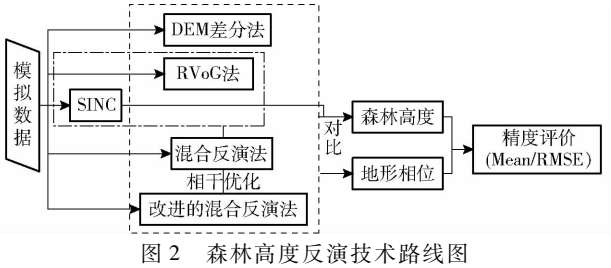


图 2 森林高度反演技术路线图

Fig. 2 Technology roadmap of retrived forest height

2.1 研究内容

2.1.1 地形相位

RVoG 模型由 TREUHAFT 等[8]建立,是森林高度反演算法的理论基础,不考虑其他的去相干因素,只考虑体散射去相干,得到相干函数为

$$\gamma(\boldsymbol{w})=\exp(\mathrm{j}\varphi_0)\frac{\gamma_v+m(\boldsymbol{w})}{1+m(\boldsymbol{w})} \tag{1}$$

式(1)也可以写成一条直线的形式,即

$$\gamma(\boldsymbol{w})=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_0}\left[\gamma_v+\frac{m(\boldsymbol{w})}{1+m(\boldsymbol{w})}(1-\gamma_v)\right]=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_0}[\gamma_v+L_{w_s}(1-\gamma_v)]\quad(0\leqslant L_{w_s}\leqslant 1)$$

其中

$$\gamma_v=\frac{\int_0^{h_v}\mathrm{e}^{2\sigma z/\cos\theta}\mathrm{e}^{\mathrm{j}k_z z}\mathrm{d}z}{\int_0^{h_v}\mathrm{e}^{2\sigma z/\cos\theta}\mathrm{d}z} \tag{2}$$

$$k_z=\frac{4\pi\Delta\theta}{\lambda\sin\theta}\approx\frac{4\pi B_n}{\lambda R\sin\theta}$$

$$L_{w_s}=\frac{m(\boldsymbol{w})}{1+m(\boldsymbol{w})}=\frac{\frac{R_{\mathrm{ground}}}{R_{\mathrm{volume}}}}{1+\frac{R_{\mathrm{ground}}}{R_{\mathrm{volume}}}}=\frac{R_{\mathrm{ground}}}{R_{\mathrm{ground}}+R_{\mathrm{volume}}}$$

式中 $\boldsymbol{w}$——与极化状态有关的单位矢量

φ_0——地形相位

$m(\boldsymbol{w})$——有效地体幅度比率($R_{\mathrm{ground}}/R_{\mathrm{volume}}$),一个与极化有关的函数

γ_v——“纯”体散射去相关系数

σ——消光系数 h_v——森林高度

z——散射层位置

θ——平均入射角

k_z——垂直波数 B_n——垂直基线

L_{w_s}——地面散射比例

R_{ground}——地面散射 R_{volume}——冠层散射

当 $m(\boldsymbol{w})$取不同极值时,可得

$$\begin{cases}\gamma_{w_s}=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_0}\dfrac{\gamma_v+m(\boldsymbol{w})}{1+m(\boldsymbol{w})}\\ \gamma_{w_v}=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_0}\gamma_v\end{cases} \tag{3}$$

式中 γ_{w_v}——与森林冠层散射矢量相对应的冠层散射复相干

γ_{w_s}——与地面散射矢量相对应的地面散射复相干

根据式(3)求得地形相位 φ_0 的计算公式为

$$\varphi_0=\arg((\gamma_{w_s}-\gamma_{w_v}(1-L_{w_s}))/L_{w_s}) \tag{4}$$

其中

$$L_{w_s}=\frac{-B-\sqrt{B^2-4AC}}{2A} \tag{5}$$

$$A = |\gamma_{w_v}|^2 - 1$$

$$B = 2\mathrm{Re}((\gamma_{w_s} - \gamma_{w_v})\gamma_{w_v}^*)$$

$$C = |\gamma_{w_s} - \gamma_{w_v}|^2$$

2.1.2　森林高度

DEM 差分法是一种传统的高度反演方法，其基本思想是通过森林层相位中心和地形相位中心的差值来提取森林高度。DEM 差分法虽然原理简单，计算量小，但是反演结果往往会低估且精度较低[28-29]。

RVoG 法基于 RVoG 模型根据式(4)估计地形相位，通过森林冠层散射的复相干、地形相位和垂直波数的关系来反演森林高度。由于 HV 相位中心可能位于森林高度的一半与树冠顶部之间的任意位置，并且没有单一的 $\boldsymbol{w}_s$ 可以产生地形相位 φ_0 的无偏估计[36]，因此 RVoG 法反演的森林高度通常被低估。

复相干幅度反演法(SINC 反演)：当消光系数为零时，RVoG 模型中的“纯”体散射相干 γ_v 变为 SINC 函数的形式，即当消光系数为零时，式(2)推导为 $\gamma_v = \lim\limits_{\sigma\to 0}\left(\dfrac{\int_0^{h_v} e^{2\sigma z/\cos\theta} e^{jk_z z}\mathrm{d}z}{\int_0^{h_v} e^{2\sigma z/\cos\theta}\mathrm{d}z}\right) = e^{j\frac{1}{2}k_z h}\,\mathrm{sinc}\left(\dfrac{1}{2}k_z h\right)$，由此可得 $h_v = \dfrac{2\arcsin(|\gamma_{w_v}|)}{k_z}$ 在小基线的情况下，森林高度可以写成：$h_v = \dfrac{\pi - 2\arcsin((|\gamma_{w_v}|)^{0.8})}{k_z}$，仅仅使用“纯”体散射复相干的幅度反演森林高度，但由于忽略了非体散射去相干的影响，因此复相干幅度反演算法总是出现高估现象。

为了克服 RVoG 法存在的低估问题，可以使用相干幅度校正项对森林高度的低估进行部分补偿。为此，CLOUDE 提出了混合反演法，通过选择合理的 ε，使用相干幅度来弥补由相位反演森林高度时没有考虑的森林顶部高度的“压缩”现象，进一步提高了森林高度反演的精度。

本文基于 FLYNN 等[30]提出的相干分离最大算法确定与地面散射和冠层散射相对应的复相干，改进了混合反演法。PolInSAR 的基本雷达观测是一个 6×6 的极化干涉相干矩阵，定义为

$$\langle \boldsymbol{k}\boldsymbol{k}^* \rangle = \begin{bmatrix} \boldsymbol{T}_{11} & \boldsymbol{\Omega}_{12} \\ \boldsymbol{\Omega}_{12}^* & \boldsymbol{T}_{22} \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中　$\boldsymbol{k}$——由干涉基线两端构成的与散射机制相对应的极化干涉散射矢量(6×1)

$\boldsymbol{T}_{11}$、$\boldsymbol{T}_{22}$——两幅图像的自相关矩阵(3×3)

$\boldsymbol{\Omega}_{12}$——两幅图像的极化互相关矩阵(3×3)

$\boldsymbol{\Omega}_{12}^*$——矩阵 $\boldsymbol{\Omega}_{12}$ 的共轭转置

使用全极化数据获得的特征值作为“自由”参数 Φ 的函数为

$$\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{\Omega}_H(\Phi)\boldsymbol{w} = \lambda(\Phi)\boldsymbol{w} \tag{7}$$

其中　$\boldsymbol{\Omega}_H = \dfrac{1}{2}(\boldsymbol{\Omega}_{12}e^{i\Phi} + \boldsymbol{\Omega}_{12}^* e^{-i\Phi})$

$$\boldsymbol{T} = \frac{1}{2}(\boldsymbol{T}_{11} + \boldsymbol{T}_{22})$$

式中　Φ——相位角

$\lambda(\Phi)$——与相位角对应的特征值

对于每个相位角 Φ，找到 $\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{\Omega}_H(\Phi)$ 的最大特征值与最小特征值之间的距离，在所有 Φ(0°～180°)的范围内找到该距离的最大值，即自动找到了最大间隔。根据特征值获得其相应的极化散射机制 $\boldsymbol{w}_{\max}$、$\boldsymbol{w}_{\min}$ 及其对应的复相干 $\gamma_{\max}$、$\gamma_{\min}$。定义一个体散射的极化散射机制 $\boldsymbol{w}_v = [0 \quad 0 \quad 1]'$，根据

$$\begin{cases} \gamma_{w_v} = \gamma_{\min} \quad \gamma_{w_s} = \gamma_{\max} \quad (|\boldsymbol{w}_{\max}^*\boldsymbol{w}_v| < |\boldsymbol{w}_{\min}^*\boldsymbol{w}_v|) \\ \gamma_{w_v} = \gamma_{\max} \quad \gamma_{w_s} = \gamma_{\min} \quad (|\boldsymbol{w}_{\max}^*\boldsymbol{w}_v| > |\boldsymbol{w}_{\min}^*\boldsymbol{w}_v|) \end{cases} \tag{8}$$

确定其中哪一个对应地面散射或冠层散射的散射机制，并对复相干进行最优排序。

根据式(4)计算出地形相位，然而即便通过相位分离，相位中心也可能位于顶部高度的一半与顶部高度之间的任意位置，仍然低估森林高度[36]，因此还需要相干幅度项。在小基线的情况下，使用一个近似的算法，这个算法可以补偿一些结构上的变化[20,35]，即

$$h_v = \frac{\arg(\gamma_{w_v}) - \varphi_0}{k_z} + \varepsilon\,\frac{\pi - 2\arcsin((|\gamma_{w_v}|)^{0.8})}{k_z} \tag{9}$$

式中　ε——权重

第 1 项代表相位分量；第 2 项为相干幅度校正项，为了解决第 1 项相位估计森林高度存在的低估问题，第 2 项使用相干幅度对其进行补偿；ε 尽可能使整个公式对结构函数的变化更加稳健。

2.2　评价标准

由于模拟的森林高度为 18 m，5 种方法反演森林高度的范围大致位于 3～30 m 之间，因此对位于图 1 红色区域内 3～30 m 的森林高度的 1 104 个样本点进行统计。应用算术平均值和均方根误差这 2 个统计指标对森林高度反演的方法进行定量分析，公式为

$$\bar{h} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} h_i \tag{10}$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} |h_i - h_0|^2}{N}} \tag{11}$$

式中 h_i——反演出的森林高度或地形相位

h_0——模拟森林高度或地形相位

N——样本点总数

3 结果与分析

3.1 地形相位

复相干幅度反演法未使用地形相位反演森林高度,其他 4 种方法需要估计地形相位,再根据地形相位来反演森林高度。因此,地形相位的误差可能会影响森林高度反演的结果,有必要给出 DEM 差分法、RVoG 法/混合反演法、改进的混合反演法估计地形相位的结果。地面散射的比例图如图 3 所示。地形相位估计的三维图如图 4 所示。图 5 为图 1 中方位向为 48 bin 时(黄色直线)地形相位的剖面图。

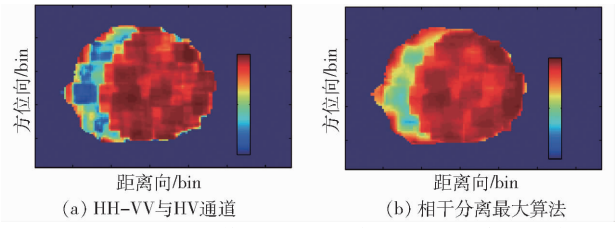


图 3 根据式(5)估计的 L_{w_s} 图像,即地面散射的比例

Fig. 3 Image of estimated L_{w_s} according to formula (5), namely ratio of ground scatter

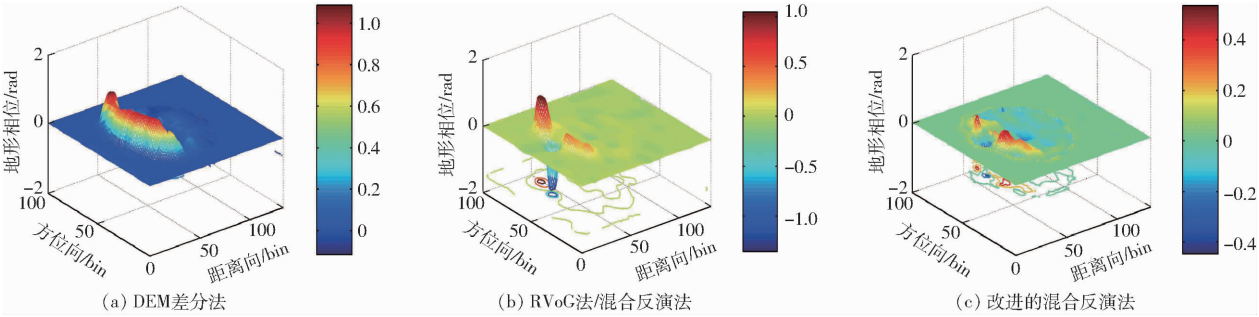


图 4 地形相位估计三维图

Fig. 4 3D diagrams of estimated ground phase

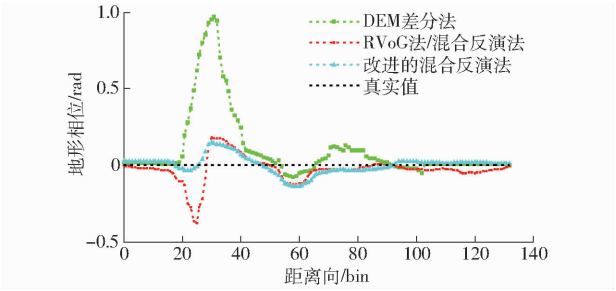


图 5 方位向为 48 bin 时地形相位估计剖面图

Fig. 5 Profile diagram of estimated ground phase at azimuth of 48 bin

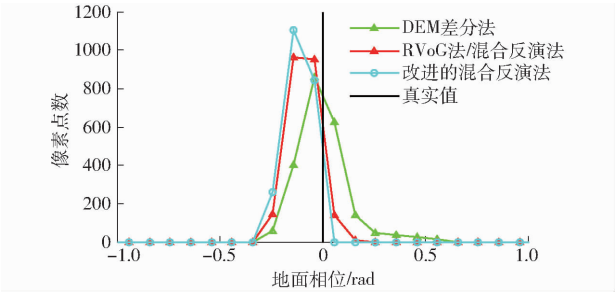


图 6 地形相位估计统计图

Fig. 6 Statistical diagram of estimated ground phase

由图 3、4 可得:图 3 地面散射比例小的区域,地形相位估计的误差大,图 3a 地面散射比例小的区域,图 4a 与 4b 估计的地形相位误差明显大;图 3b 中地面散射比例小的区域,图 4c 估计的地形相位误差明显大。由图 4、5 可以看出,DEM 差分法估计的地形相位高于真实值,RVoG 法/混合反演法出现了一部分负值,并且负值较大,改进的混合反演法估计出的地形相位在 0 值附近,最接近于模拟的地形相位。

由于地形相位的真实值为 0,平均值容易出现正负抵消的现象,因此增加了绝对值的算术平均值进行定量分析。图 6 为图 1 红色区域的地形相位的统计图,并列出地形相位的平均值、均方根误差、绝对值的平均值来定量分析地形相位的误差。改进的混合反演法、RVoG 法/混合反演法、DEM 差分法地形相位估计平均值分别为 -0.018、0.011、0.1 rad;改进的混合反演法、RVoG 法/混合反演法、DEM 差分法,地形相位估计的均方根误差分别为 0.045、0.054、0.15 rad;改进的混合反演法、RVoG 法/混合反演法、DEM 差分法,地形相位估计的绝对值的平均值分别为 0.03、0.04、0.1 rad。DEM 差分法估计出的地形相位高于真实值,误差最大;改进的混合反演法估计出的地形相位最接近于模拟的地形相位,RMSE 最小,绝对值的平均值与真实值最接近,并且离散程度小,具有一定的稳健性,结果最优;RVoG 法/混合反演法反演的地形相位正负抵消,导致其平均值最小,但其绝对值平均大于改进的混合反演法,小于 DEM 差分法,介于两者之间。

3.2 森林高度

图 7 为反演的森林高度三维图。图 8 为图 1 中方位向为 48 bin 时(黄色直线)的森林高度剖面图。

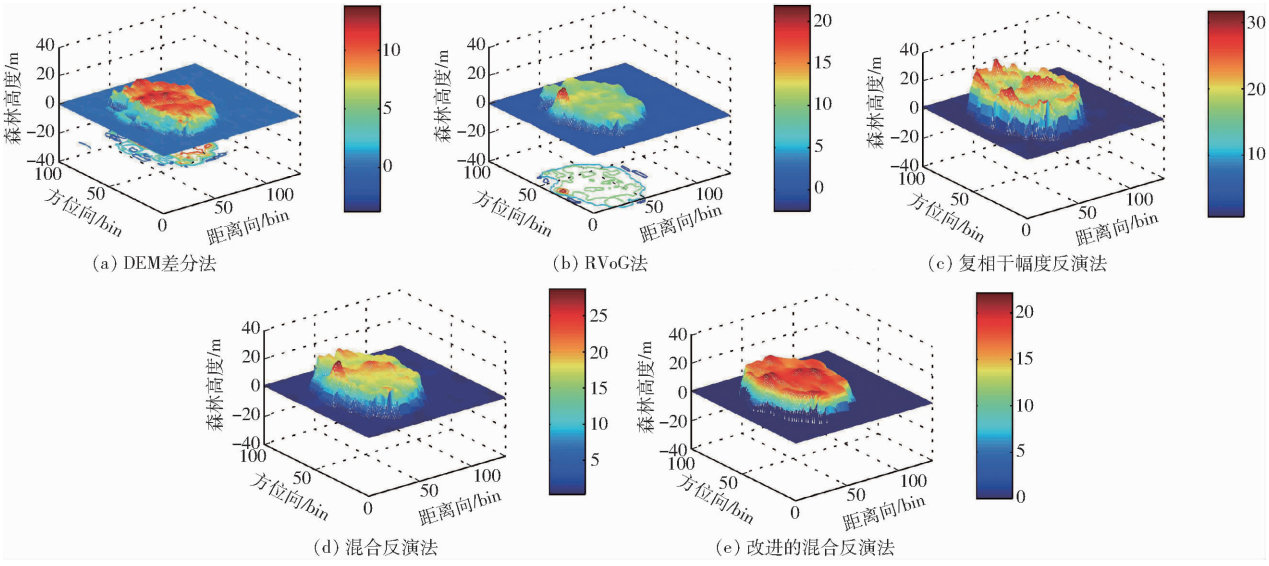


图 7　森林高度反演三维图

Fig. 7　3D diagram of retrived forest height

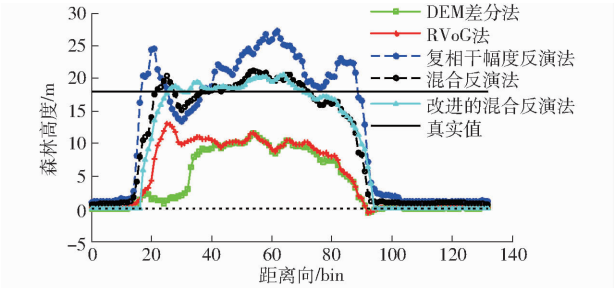


图 8　方位向为 48 bin 时的森林高度剖面图

Fig. 8　Profile diagram of forest height at azimuth of 48 bin

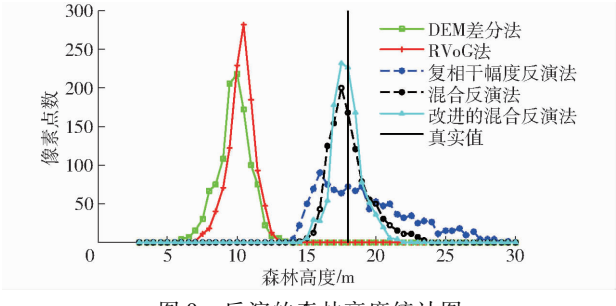


图 9　反演的森林高度统计图

Fig. 9　Statistical diagram of retrived forest height

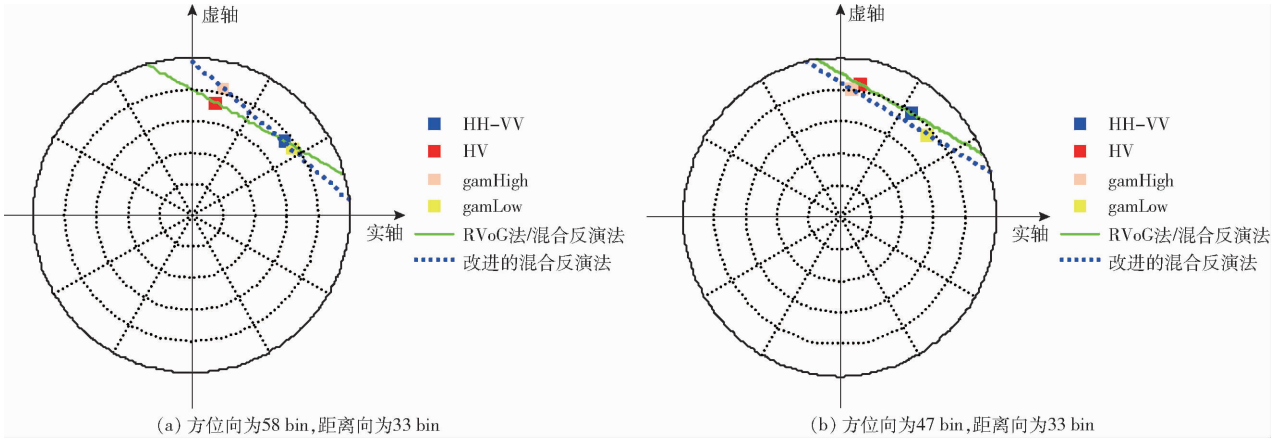
5 种反演的森林高度整体趋势基本相同。DEM 差分法与 RVoG 法明显低估了森林高度，都出现了负值，且 DEM 差分法的负值更低，整体上 RVoG 法略优于 DEM 差分法；复相干幅度反演法只使用相干幅度，明显高估了森林高度，波动最大，算法最不稳健；基于相位估计的方法（DEM 差分法、RVoG 法）虽然造成森林高度的低估，但相对稳定，基于相干幅度估计的方法出现明显高估的现象，且波动最大，结合相位与相干幅度的混合反演法对 RVoG 法的低估有较大的改善，并在一定程度上减缓了复相干幅度反演法的波动，反演的森林高度接近真实值，并且反演结果明显有所提高。改进的混合反演法，使用相干分离最大算法的相干优化法，使得反演的森林高度最接近真实值，波动更小，算法更加稳健，反演结果最优。

图 1 红色区域反演的森林高度统计图如图 9 所示，并列出了森林高度的平均值、均方根误差来定量分析森林高度反演的方法。5 种方法（复相干幅度反演法、混合反演法、改进的混合反演法、RVoG 法、DEM 差分法）的森林高度平均值分别为 19.40、18.31、18.12、10.55、10.05 m，与真实值的差异依次为：1.40、0.31、0.12、－7.45、－7.95 m；均方根误差由小到大依次为：改进的混合反演法、混合反演法、复相干幅度反演法、RVoG 法、DEM 差分法，分别为 1.06、1.48、3.49、7.51、8.04 m。与模拟的真实值 18 m 相比，DEM 差分法与 RVoG 法都明显低估森林高度，均方根误差（7.51/8.04 m）都很大，并且 DEM 差分法是 5 种方法中最差的，RVoG 法次之；复相干幅度反演法高估了森林平均高度 1.4 m，离散程度最大，但与前 2 种方法相比，均方根误差（3.49 m）明显降低；混合反演法综合了 RVoG 法与复相干幅度反演法的优势，反演的森林高度非常接近真实值（相差 0.31 m），并且均方根误差下降到 1.48 m；改进的混合反演法基于相干分离最大算法的相干优化方法，反演的森林高度与真实值仅相差 0.12 m，均方根误差最小（1.06 m）。改进的混合反演法与真实值最接近，离散程度最小，精度最优，并且具有一定的鲁棒性。

4　讨论

分析地形相位估计的结果，可能由以下两个方面造成的：地面散射的比例：地形相位在地面散射所占比例小的区域，误差都比较大；结合图 3 与图 4，

图 3 地面散射比例小的区域,图 4 估计的地形相位的误差比较大,而地面散射所占比例较大的区域,估计的地形相位的误差明显降低。DEM 差分法直接使用代表地面散射的复相干的相位估计地形相位,即直接使用 γ_{HH-VV} 的相位来估计地形相位;虽然 RVoG 法/混合反演法与改进的混合反演法都根据 RVoG 模型推导出的式(4)来估计地形相位,但是其使用的复相干不同:RVoG 法/混合反演法使用 γ_{HH-VV} 与 γ_{HV} 分别作为地面散射与冠层散射对应的复相干,改进的混合反演法使用相干分离最大算法的相干优化法后的复相干分别作为地面散射与冠层散射对应的复相干。图 10 相位优化前后的比较,其中正方形为复相干,HH - VV、HV 分别代表 HH - VV、HV 通道的复相干值,gamHigh、gamLow 分别为经过相干分离最大算法后对应的冠层散射与地面散射的复相干;RVoG 法/混合反演法的绿色直线是由 HH - VV、HV 通道的复相干在复平面内拟合的相干直线(式(1)的直线形式),改进的混合反演的蓝色虚线是由复相干 gamHigh、gamLow 在复平面内拟合的相干直线(式(1)的直线形式);经过相干分离最大算法的相干优化后,地面散射和冠层散射对应的复相干在复平面内的距离达到最大,拟合的直线更加准确,因此估计的地形相位(直线与单位圆的交点,靠近实轴的点)比 HH - VV 与 HV 通道的复相干更加准确。地面散射所占的比例越大,地形相位估计越精确;DEM 差分法的地形相位估计方法简单;与 DEM 差分法相比,RVoG 法/混合反演法、改进的混合反演法基于 RVoG 模型估计地形相位,在方法上有所改进,但由于 HH - VV 通道、HV 通道只是主导为地面散射和体散射的通道,并不纯粹,导致 DEM 差分法、RVoG 法/混合反演法估计的地形相位偏高,并且精度还有待提高,改进的混合反演法由于使用相干分离最大算法使复平面内的复相干的距离达到最大,获得了较为准确的与地面散射与冠层散射相对应的复相干,估计的地形相位接近真实值,获得了较为理想的结果。



(a) 方位向为58 bin,距离向为33 bin (b) 方位向为47 bin,距离向为33 bin

图 10 复平面内经过相干分离最大算法前后的复相干及拟合直线的比较

Fig. 10 Comprison of complex coherence and fitting straight line pre and post maximum coherence difference in a complex plane

结合地形相位的估计结果,本文比较 5 种单基线 PolInSAR 森林高度反演的方法:DEM 差分法选取 HV 通道复相干作为冠层散射的复相干,其相位中心可能位于森林高度的一半与森林高度之间的任意位置[35-36],并且其地形相位估计的结果偏高,误差最大。由于地形相位的误差传播且使用 HV 通道的复相干作为冠层散射的复相干,因此其反演的森林高度往往产生低估,并且其反演的森林高度最低,与其观点相同[28, 36-37];RVoG 法与 DEM 差分法相比,方法有所改进,虽然其根据 RVoG 模型估计的地形相位精度比 DEM 差分法高,但其仍然使用 HV 通道复相干代表冠层散射的复相干,同样造成森林高度的低估,与 DEM 差分法相比,低估的程度有所降低且均方根误差提高了 0.53 m;当相干幅度一定时,理论上复相干幅度反演法反演的森林高度应该偏低,但实际上出现了高估,因为没有考虑其他非体散射去相干的影响,将所有的复相干都归结为体散射相干,导致体散射复相干变小,使其反演的森林高度偏高[28-29],平均值高估了 1.40 m,图 8 剖面的波动与图 9 统计图的离散程度都大,反演的森林高度稳健性差[35-36],但其森林高度反演精度为 3.49 m,有了大幅提高[27];混合反演法综合考虑了相干相位与相干幅度反演各自的低估、高估问题[27-29, 36-37],由于事先知道反演的森林高度的平均值为 18 m,通过调整权重 ε 使其平均值接近真实值,反演精度得到了大幅度提升(1.48 m),图 8 剖面的波动与图 9 统计图的离散程度都小,反演的森林高度具有稳健性[36-37]。改进的混合反演法基于相干分离最大算法使冠层散射与地

面散射的复相干之间的距离在复平面内达到最大，使其比混合反演法使用的 HH－VV 通道与 HV 通道的复相干拟合的相干直线更加准确，从而使地形相位的绝对值的平均值（0.03 rad）与反演的森林高度的平均值（18.12 m）更接近真实值，且精度有所提高，图 8 剖面的波动与图 9 统计图的离散程度都很小，反演的森林高度具有一定的鲁棒性。

5　不同高度森林反演精度分析

本文模拟了与试验数据具有相同参数，但森林高度分别为 7、10、14、18、20 m 的针叶林与落叶林来进一步分析反演森林高度的精度。针叶林与落叶林估计的地形相位绝对值平均值与均方根误差如图 11 所示，森林高度平均值与均方根误差如图 12 所示；

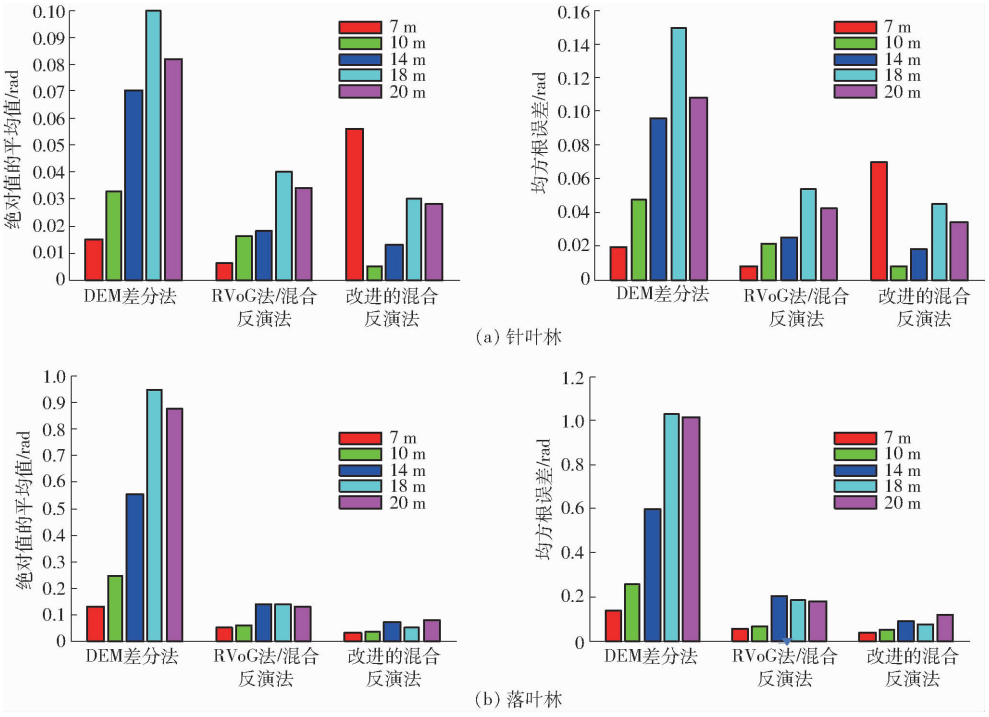


图 11　地形相位绝对值的平均值与均方根误差

Fig. 11　ABS mean and RMSE of estimated ground phase

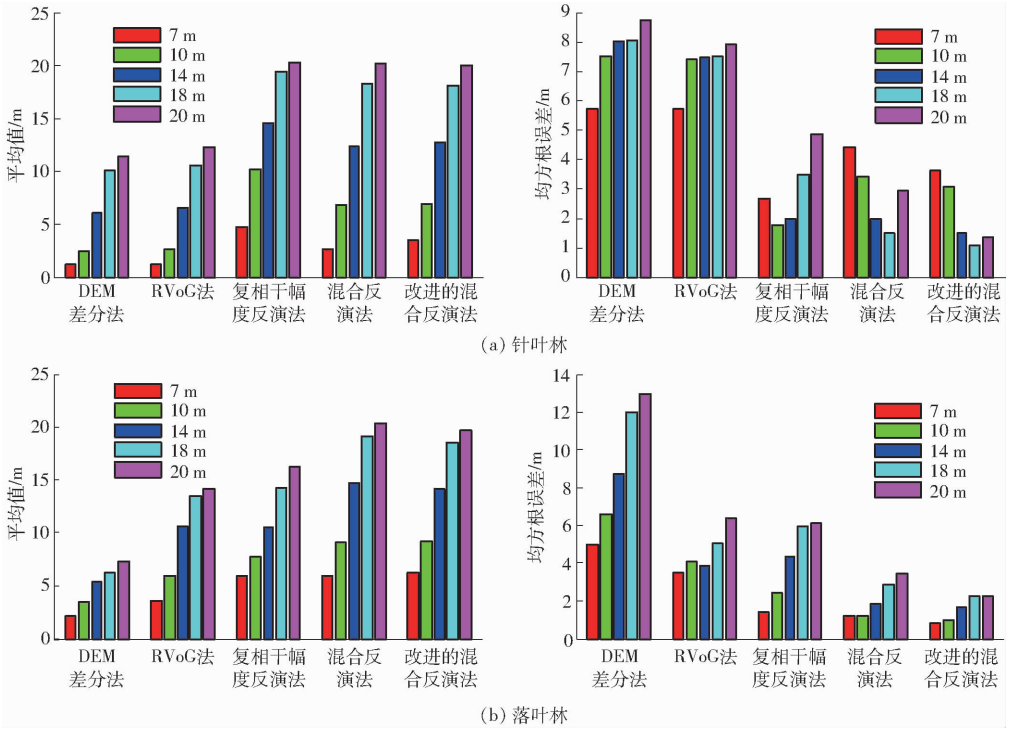


图 12　森林高度平均值与均方根误差

Fig. 12　Mean and RMSE of forest height

由图 11 可看出,除了针叶林为 7 m 时,RVoG 法/混合反演法最优之外,其他情况下改进的混合反演法估计的地形相位最优,依次为 RVoG 法/混合反演法、DEM 差分法。由图 12 可看出,森林较为低矮时,复相干幅度反演法并未出现高估现象,而是低估了森林高度,并且落叶林的复相干幅度反演法都低估了森林高度;原因可能是:低矮的森林场景自然稀疏,PolSARpro 软件模拟的落叶林场景普遍很稀疏,林中有空地,导致 HV 与 HH - VV 通道的复相干很接近,即 HV 通道有很多地面散射成分,不能很好地代表冠层散射,其幅度比真实的冠层散射的相干幅度高,造成森林高度的低估。除复相干幅度反演法外,当森林高度一定时,其他 4 种方法反演森林高度的平均值与真实值的接近程度由小到大依次为:改进的混合反演法、混合反演法、RVoG 法、DEM 差分法,且 RVoG 法、DEM 差分法都出现了低估;均方根误差由小到大依次为:改进的混合反演法、混合反演法、RVoG 法、DEM 差分法。

结合地形相位的结果,除复相干幅度反演法在稀疏与低矮森林区域产生低估,改进的混合反演法在低矮针叶林区域估计的地形相位误差较大之外,5 种方法与前文相一致,进一步验证了方法的有效性。

6 结论

(1)DEM 差分法估计的地形相位偏高,导致其反演的森林高度只为有效森林高度,造成森林高度的低估;RVoG 法与 DEM 差分法相比,估计地形相位的方法有所改进,但其只获得了比较准确的地形相位,冠层散射相位仍然不精确,同样造成森林高度的低估;复相干幅度反演法由于没有考虑其他非体散射去相干,造成森林高度的高估且稳健性差,但在稀疏与低矮森林区域出现低估现象。

(2)混合反演法综合了相干相位与相干幅度反演各自的优势,在具有一定的先验知识条件下,能获到较高的精度。

(3)改进的混合反演法基于相干分离最大算法使地面散射与冠层散射对应的复相干在复平面内的距离达到最大,拟合的直线更加准确,因此使其估计的地形相位的误差最小,同时又有相对准确的冠层散射的复相干,进一步提高了森林高度反演的精度,并且具有一定的鲁棒性。

参 考 文 献

1 杨立岩,冯仲科,范光鹏,等. 激光摄影测树仪设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(1):211 - 218. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180126&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.026.
YANG Liyan, FENG Zhongke, FAN Guangpeng, et al. Design and experiment of laser photogrammetric instrument for measuring forest[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(1):211 - 218. (in Chinese)

2 WOODHOUSE I H. Predicting backscatter-biomass and height-biomass trends using a macroecology model[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2006, 44(4): 871 - 877.

3 陈尔学, 李增元, 庞勇, 等. 基于极化合成孔径雷达干涉测量的平均树高提取技术[J]. 林业科学, 2007,43(4): 66 - 70.
CHEN Erxue, LI Zengyuan, PANG Yong, et al. Polarimetric synthetic aperture radar interferometry based mean tree height extraction technique[J]. Scientia Silvae Sinicae,2007,43(4): 66 - 70. (in Chinese)

4 吴一戎, 洪文, 王彦平. 极化干涉 SAR 的研究现状与启示[J]. 电子与信息学报, 2007,29(5): 1258 - 1262.
WU Yirong, HONG Wen, WANG Yanping. The current status and implications of polarimetric SAR interferometry[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2007,29(5): 1258 - 1262. (in Chinese)

5 郭交,尉鹏亮,周正舒,等. 基于时变特征的多时相 PolSAR 农作物分类方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):174 - 182. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171220&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.020.
GUO Jiao, WEI Pengliang, ZHOU Zhengshu, et al. Crop classification method with differential characteristics based on multi-temporal PolSAR images[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(12):174 - 182. (in Chinese)

6 苏宝峰,李锦伟,靳标,等. 非邻域相干系数估计的 PolInSAR 树高反演算法[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(12):268 - 273. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20151236&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.036.
SU Baofeng, LI Jinwei, JIN Biao, et al. Tree height inversion algorithm with PolInSAR and nonlocal coherence estimation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(12):268 - 273. (in Chinese)

7 CLOUDE R S, PAPATHANASSIOU K P. Polarimetric optimisation in radar interferometry[J]. Electronics Letters, 1997, 33(13): 1176 - 1178.

8 TREUHAFT R N, MADESEN S N, MOGHADDAM M, et al. Vegetation characteristics and underlying topography from interferometric radar[J]. Radio Science, 1996, 31(6): 1449 - 1485.

9 CLOUDE S R, PAPATHANASSIOU K P. Polarimetric SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1551 - 1565.

10 PAPATHANASSIOU K P, CLOUDE S R, REIGBER A. Vegetation and ground parameter estimation using polarimetric interferometry part II: parameter inversion and optimal polarisations[C]//ESA-SP, 2000: 353 - 358.

11 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.

12 TREUHAFT R N, CLOUDE S R. The structure of oriented vegetation from polarimetric interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2620 – 2624.

13 PAPATHANASSIOU K P, CLOUDE S R. Single-baseline polarimetric SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11): 2352 – 2363.

14 CLOUDE S R, PAPATHANASSIOU K P. Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry[J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(3): 125 – 134.

15 谈璐璐, 陈兵, 杨汝良. 利用 PolInSAR 数据反演植被高度的改进三阶段算法[J]. 系统仿真学报, 2010,22(4): 996 – 999.
TAN Lulu, CHEN Bing, YANG Ruliang. Improved three-stage algorithm of tree height retrieval with PolInSAR data[J]. Journal of System Simulation, 2010,22(4): 996 – 999. (in Chinese)

16 XIE Q, ZHU J, WANG C, et al. Boreal forest height inversion using E – SAR PolInSAR data based coherence optimization methods and three-stage algorithm[C]// International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications, 2014: 145 – 150

17 宋桂萍, 汪长城, 付海强, 等. 植被高度的极化干涉互协方差矩阵分解反演法[J]. 测绘学报, 2014,43(6): 613 – 619.
SONG Guiping, WANG Changcheng, FU Haiqiang, et al. A novel vegetation height inversion method based on polarimetric interferometric covariance matrix decomposition[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014,43(6): 613 – 619. (in Chinese)

18 ZHANG Q, LIU T, DING Z, et al. A modified three-stage inversion algorithm based on R – RVoG model for Pol – InSAR data [J]. Remote Sensing, 2016, 8(10): 861 – 878.

19 LIN D, ZHU J, FU H, et al. A TSVD-based method for forest height inversion from single-baseline PolInSAR data[J]. Applied Science,2017,7(5):435 – 451.

20 CLOUDE S R. Polarization coherence tomography(PCT): a tutorial introduction[C]// Proceedings of the San Francisco: American Geophysical Union(AGU), 2005: 1 – 55.

21 MINH N P, ZOU B. A novel algorithm for forest height estimation from PolInSAR image[J]. International Journal of Signal Processing Image Processing & Pattern Recognition, 2013, 6(2):15 – 32.

22 LI X W, GUO H D, LI Z, et al. A hybrid vegetation height estimation method using SIR – C polarimetric SAR interferometry data [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,2005:5505 – 5508.

23 李新武, 郭华东, 李震, 等. 用 SIR – C 航天飞机双频极化干涉雷达估计植被高度的方法研究[J]. 高技术通讯, 2006, 15(7): 79 – 84.
LI Xinwu, GUO Huadong, LI Zhen, et al. Method study of vegetation height estimation using SIR – C dual frequency polarimetric SAR interferometry data[J]. Chinese High Technology Letters, 2006, 15(7): 79 – 84. (in Chinese)

24 HASHJIN S S, KHAZAI S, SADEGHI A. A method to select coherence window size for forest height estimation using PolInSAR data[C]// ISPRS, 2013:505 – 508.

25 LAVALLE M, SOLIMINI D, POTTIER E, et al. Comparison of models of POLINSAR coherence for forest height retrieval using POLINSAR simulated data[C]// Proceedings of Fringe Workshop 2007,2007.

26 NEUMANN M, FERROFAMIL L, REIGBER A. Improvement of vegetation parameter retrieval from polarimetric SAR interferometry using a simple polarimetric scattering model[C]// International Workshop on Applications of Polarimetry & Polarimetric Interferometry, 2009:1 – 10.

27 CHEN E X. Comparison of methods to derive forest height from polarimetric SAR interferometry[C]// Proc. Dragon, 2008:1 – 9.

28 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)

29 张庆云, 刘国林, 陶秋香, 等. 基于极化干涉 SAR 的植被高度反演算法对比分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2014,33(3): 77 – 83.
ZHANG Qingyun, LIU Guolin, TAO Qiuxiang, et al. Algorithm comparative analysis of vegetation height inversion based on polarimetric SAR interferometric[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2014,33(3): 77 – 83. (in Chinese)

30 FLYNN T, TABB M, CARANDE R. Coherence region shape extraction for vegetation parameter estimation in polarimetric SAR interferometry[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002:2596 – 2598.

31 TABB M, ORREY J, FLYNN T, et al. Phase diversity: a decomposition for vegetation parameter estimation using polarimetric SAR interferometry[C]// Proceedings of the Fourth European Synthetic Aperture RADAR Conference, 2002:721 – 724.

32 COLIN E, TITIN C, TABBARA W. An interferometric coherence optimization method in radar polarimetry for high-resolution imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2005, 44(1): 167 – 175.

33 COLIN E, TITIN C. Investigation on different interferometric coherence optimization methods[C]// Proceedings of the Workshop on POLinSAR – Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry,2003:1 – 6.

34 史磊. 多基线 POLINSAR 植被高度与植被下地形估计[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
SHI Lei. Vegetation height and underlying ground altitude estimation based on multi-baseline POLINSAR images[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013. (in Chinese)

35 CLOUDE S R. Polarisation applications in remote sensing[M]. New York: Oxford University Press Inc., 2010.

36 CLOUDE S R. POL – InSAR training course[C]// Advance Training Course on Land Remote Sensing, 2008:1 – 44.

37 CLOUDE S R. Polarization coherence tomography[J]. Radio Science, 2006, 41(4): 495 – 507.