

非邻域相干系数估计的 PolInSAR 树高反演算法*

苏宝峰¹ 李锦伟² 靳 标¹ 郭 交¹

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 西安 710071)

摘要: 为了提高全极化干涉合成孔径雷达树高反演精度,提出了一种基于非邻域窗口相干系数估计的 PolInSAR 树木高度反演算法。该算法首先求取 4 对全极化干涉 SAR 图像的最优干涉相位图,再以局部窗口内像素的幅度和相位联合条件概率密度为准则选取与当前像素满足独立同分布的样本,进而获得相干系数的准确估计值,最后采用三段法进行树木高度反演。对仿真数据的处理结果表明,所提算法能够提高观测场景中树木高度的反演精度,并且能够很好地保持图像中的边界细节信息。

关键词: 树高反演 极化干涉合成孔径雷达 相干系数 非邻域

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0268-06

Tree Height Inversion Algorithm with PolInSAR and Nonlocal Coherence Estimation

Su Baofeng¹ Li Jinwei² Jin Biao¹ Guo Jiao¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Forest plays an important role in the terrestrial ecosystem. Acquisition of tree height has vital significances in global ecology analysis, environmental protection, national economic construction and other related fields. In the past decades, polarimetric interferometric synthetic aperture radar (PolInSAR) has been widely treated as an advanced microwave remote sensing technique to extract vegetation information of the earth surface. However, the existing methods for tree height inversion suffer seriously from the deviations of coherence estimation, especially in the case of high-resolution SAR images. In order to improve the accuracy of tree height estimation with single-baseline PolInSAR, a new tree height extraction algorithm with improved coherence estimation based on nonlocal sample selection was proposed. The optimized interferogram was firstly acquired from four pairs of quad polarimetric SAR images with the proposed algorithm, and then the independent identical distribution samples were selected which were adopted to estimate accurate coherence, and at last the classical three-stage height inversion processing procedures were employed to obtain the vegetation height. In the experiment, multiple pairs of PolInSAR data were simulated through the PolSARPro software designed by European Space Agency (ESA). From the experiments, it can be concluded that the proposed algorithm has the capacity to maintain the boundary information effectively and the accuracy of tree height estimation was increased by nearly 5%.

Key words: Tree height inversion Polarimetric interferometric synthetic aperture radar Coherence Nonlocal

收稿日期: 2015-08-24 修回日期: 2015-10-10

* 国家自然科学基金资助项目(41301450)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(QN2013066、Z109021532)、卫星测绘技术与应用国家测绘地理信息局重点实验室经费资助项目(KLSMTA-201501)和西北农林科技大学人才专项基金资助项目(Z111021302)

作者简介: 苏宝峰,讲师,主要从事农业遥感和精准农业等研究,E-mail: bfs@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 郭交,副教授,主要从事微波遥感提取地表植被信息等研究,E-mail: jiao.g@163.com

引言

合成孔径雷达(SAR)是一种高分辨率对地观测雷达,它不受光照和天气条件的影响,能够实现全天时、全天候、大范围对地观测^[1-3],而极化与干涉是 2 种重要的工作模式^[4-6];极化 SAR(PolSAR)通过增加雷达信号的极化方式来探测目标的散射机理,获取目标散射特性;干涉 SAR(InSAR)用于获得地面场景的三维信息,以不同的视角观测同一场景获得多幅 SAR 图像,对这些 SAR 图像的相位进行干涉处理,获得观测区域的三维信息。极化干涉 SAR(PolInSAR)将 InSAR 对地散射体的空间分布敏感特性同 PolSAR 对散射体的形状、方向和介电常数敏感的特性相结合,能够广泛应用于高精度三维地形测量、植被或者树木高度反演等领域^[7-9]。

在目前应用 PolInSAR 进行树木高度反演的方法中,已经获得广泛应用的是首先对树木散射采用 RVoG(Random volume over ground)两层散射模型进行建模,再利用三段法对其高度进行反演,获取高度估计值^[10-11],但是在上述文献中并未涉及相干系数估计中的样本如何选取的问题。谈璐璐等^[12]研究了简缩极化干涉数据的植被高度反演方法,利用相干区域边界提取方法更新体散射去相干系数,然而并未从极化干涉 SAR 图像像素的幅度和相位的概率分布出发,陈尔学等^[13]利用重轨的新疆和田地区数据进行了树高提取方面的研究,但是在相干系数的估计中并未考虑观测样本的幅相统计分布特性,这会影响到相干系数的估计精度,进而导致高度提取误差。从以上分析可以看出,在采用 RVoG 两层散射模型三段法进行高度反演的过程中,相干系数的准确估计对高度反演精度的影响至关重要,而单基线 PolInSAR 仅获取场景的单次观测样本,因此只能利用空间平均代替集合平均估计相干系数值。当 SAR 图像分辨率较低、观测场景较均匀时,利用局部矩形窗口选取像素样本可以获得相干系数的准确估计值,但在植被覆盖区域,往往包含不同植被或树木类型及裸露地表,这些会很大程度上破坏像素的均匀性。随着各领域需求的提高和雷达系统与相关技术的发展,SAR 图像的分辨率势必会不断提高(例如 Tandem-L 的分辨率能达到 0.5 m^[14]),树木冠层之间的空隙、树木边缘的裸露地表必然会对场景中观测样本的均匀性造成影响,导致相干系数估计偏差,因此如何合理地选择观测样本准确估计相干系数就成了影响树高反演精度的关键问题。

为了解决上述问题,本文以相干系数估计中观测样本的幅相统计分布规律为出发点,首先基于实

测的单极化干涉数据和仿真的多极化干涉数据分析植被覆盖场景中干涉 SAR 图像像素样本的不均匀性,然后从理论上分析估计相干系数时独立同分布样本点选取的理论依据,给出基于非邻域相干系数估计的树木高度反演算法流程,最后利用欧洲太空局(European Space Agency, ESA)提供的专用 PolSARPro 软件仿真生成多组数据,通过对数据的处理结果评估本文所提算法的性能。

1 场景的不均匀性分析

当观测场景中分布的目标比较单一(例如纯裸露地表或均匀分布的同类植被)、SAR 图像的分辨率较低时,全极化 SAR 干涉测量获取的干涉相位图的像素和相位分布较均匀,干涉相位图中每一像素主要包含地形相位信息和相位噪声,此时去掉平地相位的影响后可以直接采用矩形局部窗选取观测样本,对相干系数进行较准确的估计。但是如果观测场景中包含大量植被、SAR 图像分辨率较高时,植被或者树木冠层之间的空隙及裸露地表将大大破坏该区域像素的干涉相位和幅度的均匀性,而且不同高度、不同结构的植被和树木等都会对该区域的干涉相位图像素样本的均匀性造成一定影响。

图 1 是烟台某地区的 Ka 波段机载单航过单极化干涉数据,其方位向和距离向分辨率均为 0.2 m,有效基线长度为 2.95 m,场景中包含大量的植被覆盖区域。图 2 是基于 ESA 所开发的 PolSARPro 软件仿真的 L 波段全极化干涉数据,其方位向和距离向分辨率均为 0.5 m,基线长度为 20 m,仿真场景为圆形的树木覆盖区域和裸露地表。图 1a 和图 2a 为单视 SAR 幅度图像,像素的灰度代表了后向散射的大小,图 1b 是去除平地相位后的干涉相位图,图 2b 是 HH 极化对应的干涉相位图。从图 1 和图 2 的数据显示结果可以看出,不同结构、不同高度的植被,植被或者树木冠层之间的空隙以及植被和裸露地表的过渡区域,都会导致 SAR 图像像素的幅度和干涉相位的不均匀性。如果直接选取正方形局部窗口内的像素样本进行相干系数的估计,由于局部窗口内不同样本特性显著不同,将会导致相干系数估计值偏离真实值,而基于 RVoG 两层散射模型利用三段法进行高度反演,严重依赖于相干系数的估计精度,因此其高度反演精度也势必会降低。

2 基于非邻域窗口相干系数估计

理论上相干系数的估计总是假定局部窗口内用于相干系数估计的观测样本满足独立同分布的假设条件,此时获得的相干系数估计值在统计意义上才

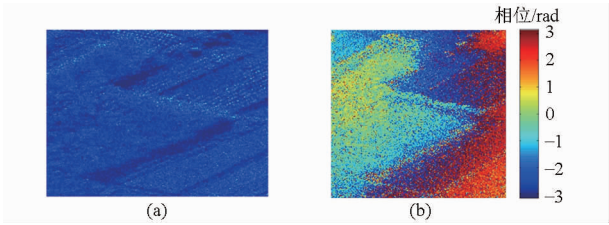


图 1 机载实测干涉数据
Fig. 1 Airborne real InSAR data
(a) 单视 SAR 幅度图 (b) 干涉相位图

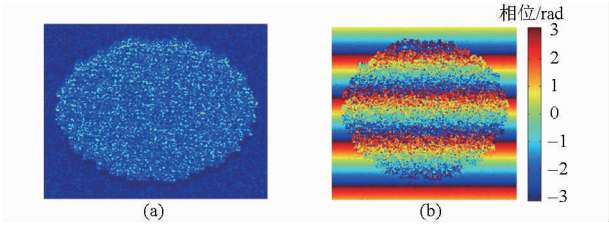


图 2 PolSARPro 仿真干涉数据图
Fig. 2 Simulated InSAR data by PolSARPro software
(a) 单视 SAR 幅度图 (b) 干涉相位图

是最优的^[15],然而在实际的数据处理中,地物的不均匀性会导致局部窗口内的样本点很难严格满足独立同分布条件,因此,在数据处理中应尽量选取与当前估计像素具备相同特性的样本点进行相干系数估计,实际处理中为了减小运算量,可将不具备同一性的样本点以一定的准则进行识别,在相干系数估计过程中去除这些观测样本的影响,以提高相干系数的估计精度。

假设 c 为当前像素,其对应的相干系数为 γ_c ,干涉相位为 $\bar{\varphi}_c$,幅度为 I_c 。Deledalle 给出的干涉相位图像素幅度和相位的联合条件概率密度函数为^[16]

$$p(I_t, \varphi_t | I_c, \gamma_c, \bar{\varphi}_c) = \frac{2I_t}{\pi I_c^2 (1 - \gamma_c^2)} \cdot \exp\left(-2I_t \frac{1 - \gamma_c \cos(\varphi_t - \bar{\varphi}_c)}{I_c (1 - \gamma_c^2)}\right) \quad (1)$$

式中 I_t ——像素 t 的幅度
 φ_t ——像素 t 的干涉相位

为了使式(1)表示的概率密度对不同的参数具有可比性,从理论上详细推导了上述条件概率密度的归一化^[17]形式,公式为

$$p_{\text{normal}}(I_t, \varphi_t | I_c, \gamma_c, \bar{\varphi}_c) = \frac{2I_t e}{I_c (1 + \gamma_c)} \cdot \exp\left(-2I_t \frac{1 - \gamma_c \cos(\varphi_t - \bar{\varphi}_c)}{I_c (1 - \gamma_c^2)}\right) \quad (2)$$

这样,就可以依据式(2)所表述的归一化条件概率密度函数去衡量局部窗口内的像素是否与当前像素满足独立同分布的条件,在处理中通过合理设置阈值 $P_{\text{threshold}}$,当像素 t 的条件概率密度大于 $P_{\text{threshold}}$ 时,就选取其为有用像素,否则,将该像素从

当前局部窗口样本中进行剔除,以保证用于估计相干系数的像素样本尽量满足独立同分布条件。

3 参数确定

为了计算式(1)所描述的条件概率密度函数 p 和式(2)表示的归一化条件概率密度函数 p_{normal} ,需要确定 I_c 、 γ_c 和 $\bar{\varphi}_c$ 的初始值,即

$$I_c = \frac{1}{N} \sum_{i \in w} A_{mi} A_{si} \quad (3)$$

$$\gamma_c = |\rho_c| \quad (4)$$

$$\bar{\varphi}_c = \arg \rho_c \quad (5)$$

$$\text{其中 } \rho_c = \frac{\left| \sum_{t \in w} S_{mt} S_{st}^* \right|}{\sqrt{\sum_{t \in w} |S_{mt}|^2 \sum_{t \in w} |S_{st}|^2}} \quad (6)$$

式中 w ——当前像素的局部滤波窗口

ρ_c ——复相干系数

A_{mi} ——主天线 SAR 图像像素 i 幅度

A_{si} ——副天线 SAR 图像像素 i 幅度

S_{mt} ——主天线 SAR 图像像素 i 复数

S_{st} ——副天线 SAR 图像像素 i 复数

$*$ 表示取共轭操作; $\arg$ 表示取相角操作。

由式(3)~(6)可以看出,参数 I_c 、 γ_c 和 $\bar{\varphi}_c$ 的估计结果必然会受到所选样本统计特性的影响,为了提高参数估计精度,本文以干涉相位图幅度差异最小为准则选取一些样本点作为初始值,即首先通过幅度与当前像素差异最小的几个样本利用公式估计 I_c 、 γ_c 和 $\bar{\varphi}_c$ 的初始值,然后根据式(2)对每一个样本的条件概率密度进行计算,选取概率密度较大的样本点进行迭代运算,最后通过设定合适的门限值,确定出满足独立同分布的样本点。

4 改进的高度反演算法

全极化 PolInSAR 具有 4 种不同的极化方式(即 HH、HV、VV、VH),相应地对地面同一观测场景能够获取 4 对干涉 SAR 图像,对应产生 4 幅干涉相位图,但是对于树木覆盖的区域,树木散射的影响会形成严重的体散射去相干,为了有效降低这种去相干因素,对 4 幅极化 InSAR 干涉相位图进行相干最优处理,以减小因多重散射中心高度差异引起的体散射去相干,从而得到相干性最优的干涉图像^[18]。因此,为了在局部窗口内准确选取具有同一分布特性的样本,本文算法首先对全极化 PolInSAR 进行极化相干最优,其次基于相干最优的干涉相位图对初始参数进行确定,再根据式(2)在局部窗口内进行独立同分布的样本选取,获得相干系数的精确估计,最后结合两层 RVoG 散射模型利用三段法进行树木高

度反演,获得场景中树木高度的估计。本文所提算法的处理流程如图 3 所示。

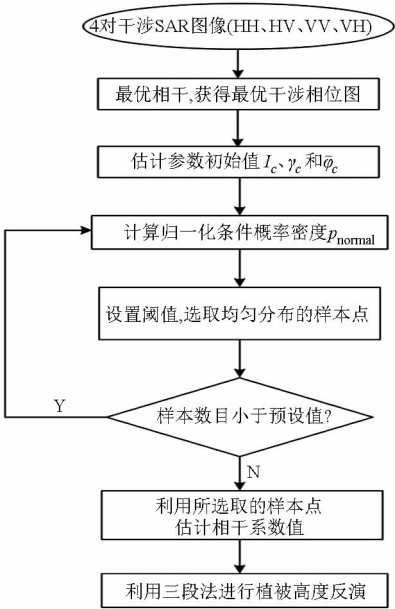


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of proposed algorithm

5 性能分析

利用 L 波段的仿真数据对基于非邻域窗口相干系数估计的 PolInSAR 树木高度反演算法的性能进行分析。仿真数据利用 ESA 所开发的 PolSARPro 软件生成,仿真参数设置如下:载机飞行高度为 3 000 m,下视角为 45°,垂直航向有效基线长度为 30 m,载波中心频率为 1.3 GHz,方位和距离分辨率均为 0.5 m,仿真场景为平地,其上分布树木,树木类型为松树,平均高度为 9 m。

在第 1 个实验中,设置场景大小为 31 500 m²,该场景中共包含 53 棵树,平均树高为 9 m,图 4 给出了仿真场景的三维示意图,图 5 为仿真生成的主天线 HH 通道极化 SAR 图像,其余 7 幅 SAR 图像幅度结果类似。图 6a、6b 分别为采用传统处理算法和本文算法所获取的树高反演结果。为了比较传统算法和本文算法的树高反演性能,对单颗数的结果进行放大显示,并且加入与 SAR 图像幅度图的对比,如图 7 所示。从图 6 和图 7 的反演结果及其对比可以看出,传统算法由于在选取相干系数样本时并未考虑其分布特性,导致实际的反演结果比较平均,而且在树木和地面的边界区域反演面积大大增加,本文改进算法的处理结果能够很好地区分满足均匀分布的样本,以保证反演结果和 SAR 图像直观显示的结果更具有 consistency,当分辨率很高时,这一点就显得更加重要。

在第 2 个实验中,设置场景大小为 31 500 m²,

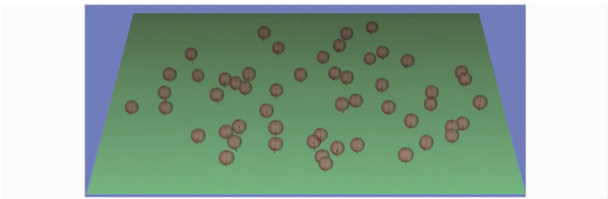


图 4 仿真场景三维示意图

Fig. 4 3D sketch map of simulated scene

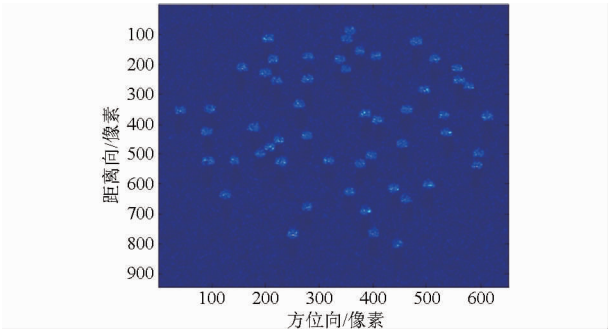


图 5 HH 通道的极化 SAR 图像 (实验 1)

Fig. 5 Polarimetric SAR image from HH channel (experiment 1)

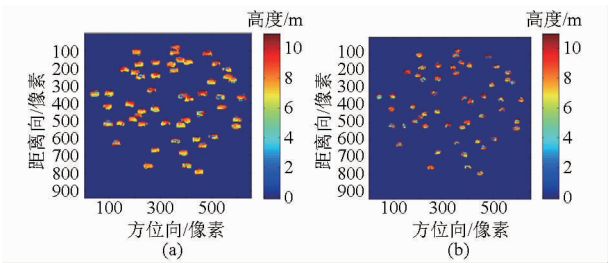


图 6 树高反演结果 (实验 1)

Fig. 6 Results of tree height inversion (experiment 1)

(a) 传统算法 (b) 本文算法

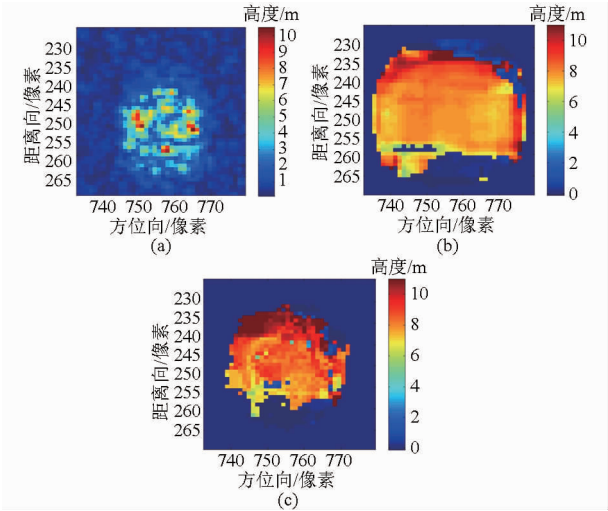


图 7 单颗树高反演结果对比

Fig. 7 Comparison of single tree height inversion

(a) SAR 图像 (b) 传统算法反演结果 (c) 本文算法反演结果

该场景树分布密度为 3 000 棵/hm²,平均树高为 9 m,图 8 为仿真生成的主天线 HH 通道极化 SAR

图像。图 9 为采用传统处理算法和本文算法所获取的树高反演结果。从图 9 的反演结果可以看出,在树木和地面的边界区域,由于采用了独立同分布的样本选取策略,因而可以保证地面和树木覆盖边界的细节信息,得到更精确的反演结果。图 10 给出了局部区域边界提取结果比较,其中图 10a、10b、10c 分别为 SAR 图像、传统算法树高反演和本文算法树高反演的局部区域边界提取结果,图 10d 为 3 个局部边界的比较结果,从其中可以明显看出,本文算法的反演结果与 SAR 图像在边界处的一致性更好,即在树木和地面的过渡区域,具有很好的边界保持性能。

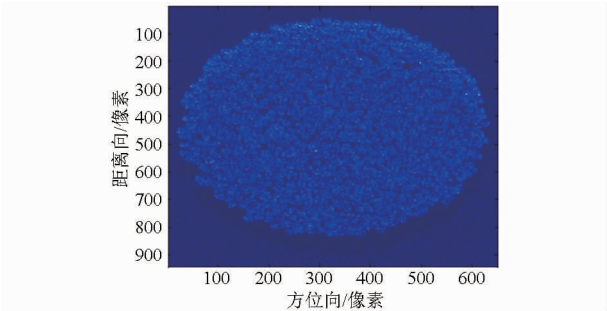


图 8 HH 通道的极化 SAR 图像(实验 2)
Fig. 8 Polarimetric SAR image from HH channel
(experiment 2)

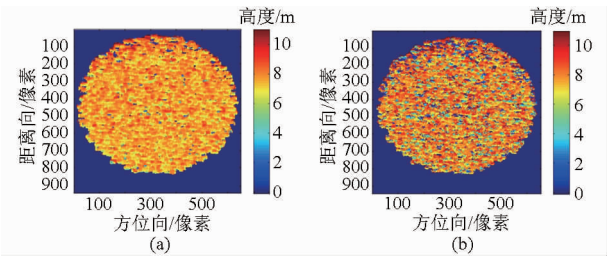


图 9 树高反演结果(实验 2)
Fig. 9 Results of tree height inversion (experiment 2)
(a) 传统算法 (b) 本文算法

为了进一步对 2 种树高反演算法的性能进行分析比较,对整个场景的树高反演结果进行统计,得到 2 种算法的树高反演结果分布的统计直方图,如图 11 所示,从图 11 中可以得到以下结论:传统算法估计的平均树高约为 8.2 m,而本文算法所获得的平均树高约为 8.6 m,更加接近于仿真场景的实际树高,平均树高的估计精度提高约 5%,一定程度上提高了树高估计的精度;相比于传统算法,本文算法所获得的树高反演结果分布更加集中在峰值附近,这也能够从另一个角度反映出本文所提算法能够提

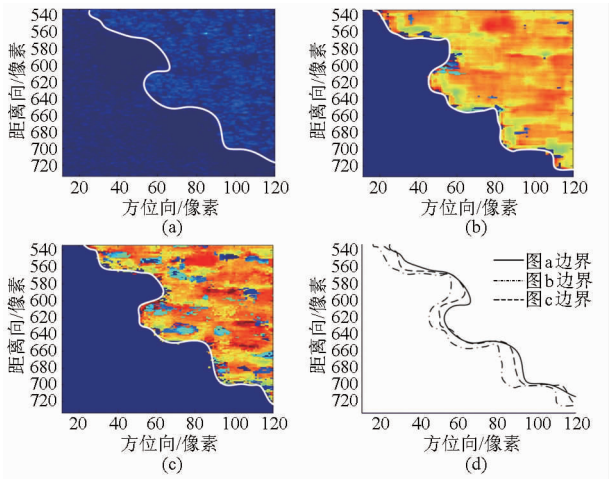


图 10 局部边界提取结果比较

Fig. 10 Comparison of extraction results for local boundaries
(a) SAR 图像局部边界 (b) 传统算法局部边界
(c) 本文算法局部边界 (d) 局部边界结果比较

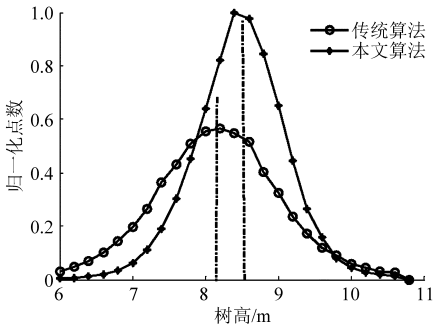


图 11 树高反演结果统计直方图

Fig. 11 Statistical histogram of tree height inversion

高树高估计的稳健性,并且充分保持树高反演结果的细节信息。

6 结论

(1)提出了一种基于非邻域窗口相干系数估计的 PolInSAR 树木高度反演算法。该算法根据 SAR 图像像素的幅度和相位联合条件概率密度选取与当前估计像素尽量满足独立同分布的样本,提高相干系数的估计精度,再利用经典的三段法进行树木高度反演。文中对仿真数据的处理结果表明,该算法能够一定程度上提高树木高度的反演精度及其稳健性。

(2)从对多组 PolInSAR 仿真数据的处理结果可以看出,利用本文的算法能够有效地保持图像中的边界等细节信息,并且可以将平均树高的估计精度提高约 5%。

参 考 文 献

1 Krieger G, Hajnsek I, Papathanassiou P, et al. Interferometric synthetic aperture radar (SAR) missions employing formation flying [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5): 816 – 843.

- 2 王松寒, 何隆华. 雷达遥感技术在水稻识别中的研究进展[J]. 遥感信息, 2015, 30(2): 3–9.
Wang Songhan, He Longhua. Advances of rice recognition by SAR[J]. Remote Sensing Information, 2015, 30(2): 3–9. (in Chinese)
- 3 史舟, 梁宗正, 杨媛媛, 等. 农业遥感研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 247–260.
Shi Zhou, Liang Zongzheng, Yang Yuanyuan, et al. Status and prospect of agricultural remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 247–260. (in Chinese)
- 4 Omari K, White P H, Staenz K, et al. Retrieval of forest canopy parameters by inversion of the PROFLAIR leaf-canopy reflectance model using the LUT approach[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013, 99: 1–10.
- 5 王馨爽, 陈尔学, 李增元, 等. 多时相双极化合成孔径雷达干涉测量土地覆盖分类方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(5): 533–540.
Wang Xinshuang, Chen Erxue, Li Zengyuan, et al. Multi-temporal and dual-polarization interferometric SAR for land cover type classification[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(5): 533–540. (in Chinese)
- 6 Tebaldini P S. Single and multipolarimetric SAR tomography of forested areas: a parametric approach[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(5): 2375–2387.
- 7 Arnaubec A, Roueff A, Dubois-Fernandez P, et al. Vegetation height estimation precision with compact PolInSAR and homogeneous random volume over ground model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(3): 1879–1891.
- 8 卢红喜, 李东霖, 刘宏伟, 等. 双基线极化干涉 SAR 植被参数反演[J]. 西安电子科技大学学报, 2015, 42(6): 27–34.
Lu Hongxi, Li Donglin, Liu Hongwei, et al. Forest parameters retrieval with dual-baseline polarimetric SAR interferometry based on clustering analysis[J]. Journal of Xidian University, 2015, 42(6): 27–34. (in Chinese)
- 9 Marco L, Kosal K. Three-baseline InSAR estimation of forest height[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(10): 1737–1741.
- 10 Martínez L C, González 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.
- 11 Cloude S R, Papathanassiou K. Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry[J]. IEEE Proceedings of Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(3): 125–134.
- 12 谈璐璐, 杨立波, 杨汝良. 合成孔径雷达简缩极化干涉数据的植被高度反演技术研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2814–2819.
Tan Lulu, Yang Libo, Yang Ruliang. Investigation on vegetation height retrieval technique with compact PolInSAR data[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(12): 2814–2819. (in Chinese)
- 13 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): 66–71.
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): 66–71. (in Chinese)
- 14 Keieger G, Hajnsek I, Papathanassiou K, et al. Tandem-L: an innovative interferometric and polarimetric SAR mission to monitor earth system dynamics with high resolution[C]//Proceedings IGARSS 10, 2010: 253–256.
- 15 Vasile G, Trounev E, Lee S J. Intensity-driven adaptive-neighborhood technique for polarimetric and interferometric SAR parameters estimation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(6): 1609–1621.
- 16 Deledalle C, Denis L, Tupin F. NL-InSAR: non-local interferogram estimation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(4): 1441–1452.
- 17 Jinwei L, Zhenfang L, Zheng B, et al. Noise filtering of high-resolution interferograms over vegetation and urban areas with a refined nonlocal filter[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(1): 77–81.
- 18 Goodman J. Speckle phenomena in optics: theory and applications[M]. Englewood, CO, USA: Roberts & Company, 2006.