

基于极化干涉 SAR 的植被高度反演算法对比分析

张庆云, 刘国林, 陶秋香, 尚玉双, 马立婷

(山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:极化干涉 SAR 综合了干涉 SAR 和极化 SAR 的优点, 被广泛应用于植被高度的反演。对已有的四种基于极化干涉 SAR 的植被高度反演算法进行了论述, 利用 PoLSARpor 进行仿真数据实验, 对比分析了四种植被高度反演算法的优缺点及其适用范围。最后指出极化干涉 SAR 技术有待进一步研究的方向和问题。为选取基于极化干涉 SAR 的植被高度反演算法提供参考。

关键词:极化干涉 SAR; 植被高度反演; PoLSARpor

中图分类号: TP722.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2014)03-0077-07

Algorithm Comparative Analysis of Vegetation Height Inversion Based on Polarimetric SAR Interferometric

Zhang Qingyun, Liu Guolin, Tao Qiuxiang, Shang Yushuang, Ma Liting

(College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The Polarimetric SAR interferometry has been widely used in forest vegetation height inversion with the integrated advantages of interferometry SAR and polarization SAR. Four kinds of existing principles of vegetation height inversion algorithms based on polarimetric SAR interferometry were discussed and the PoLSARpor simulation data test was used to compare the advantages and disadvantages of four vegetation height inversion algorithms. Finally the direction and the problems in further study of polarimetric SAR Interferometry Technology were presented. This paper serves a certain reference value for selecting the vegetation height inversion algorithm in light of polarimetric SAR interferometry.

Key words: polarimetric SAR interferometry; vegetation height inversion; PoLSARpor

极化干涉 SAR (polarimetric synthetic aperture radar interferometry, Pol-InSAR) 是一种全天时、全天候的新型微波遥感技术, 它将极化信息和干涉技术有效结合在一起, 通过多通道极化综合技术建立多极化相位干涉的定量关系, 改善干涉相位的信噪比和提高地面高度及参数反演精度。极化干涉 SAR 技术同时具有极化 SAR 对植被散射体形状和方向敏感的特性, 和干涉 SAR 对地表植被散射体空间分布和高度敏感的特性, 因此在对地表植被高度提取的研究方向上得到了广泛应用和深入研究。

在极化干涉 SAR 植被高度提取算法研究上, Treuhaft 等^[1-2]于 1996 年首次提出随机方向性散射模型, 开创了对植被高度反演算法研究的先河。1998 年, Cloude 等^[3]提出极化干涉理论, 将随机方向性模型简化

收稿日期: 2013-03-04

基金项目: 民用航天“十二五”预先研究项目; 山东省自然科学基金项目 (ZR2012DM001); 山东科技大学科研创新团队支持计划项目 (2011KYTD103)

作者简介: 张庆云 (1988—), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要进行数据处理、SAR 数据的处理与分析方面的研究。

E-mail: zhangqingyun1107@163.com

刘国林 (1966—), 男, 河南焦作人, 教授, 博士生导师, 主要从事测量数据处理、InSAR 技术及应用等方面的研究。

本文通信作者, E-mail: gliu@sdust.edu.cn

为极化干涉模型,并将其应用到植被高度反演中。2001年, Yamada 等^[4-5]提出利用 ESPRIT 算法 (estimating signal parameters via rotational invariance techniques), 通过将地表相位中心和植被相位中心分离, 估计植被的高度。2002年, Yamada 等^[6]针对 ESPRIT 算法在进行植被高度估计时精度低的问题, 指出了该方法计算出的树冠顶部的散射相位是准确的, 计算的地表相位估计存在偏差, 直接用这两者的相位差进行植被反演就会造成植被高度的不准确。2003年, Cloude 等^[7-8]依据复相干系数的复平面分布的特性进行研究, 提出了基于 RVoG (random volume over ground) 散射模型的三阶段反演算法, 简化了植被高度估计的复杂性, 获得较好的反演精度。2004年, Tabb 等^[9]提出了基于极化干涉 SAR 协方差矩阵的植被参数最大似然估计算法, 且具有较高的估计精度。2005年, Cloude^[10]等提出相位与相干幅度联合反演的算法, 保证获得的植被高度均为正值, 并使反演结果有较高的稳定性。2005年, 李新武等^[11-12]提出一种将三阶段反演方法与 ESPRIT 算法相结合的新的相位基植被高度估计方法, 并用基于重复轨道航天飞机 SIR-C 的 L 和 C 波段极化干涉雷达数据证明了该算法能够获得较高精度的植被高度。2006年, Cloude 等^[13]提出了极化相干层析 (PCT) 算法, 拓展了极化干涉 SAR 植被参数信息提取的理论和方法。2008年, 陈尔学等^[14]提出了复相干幅度反演方法, 并实验证明了该算法的可行性。2008年, 陈兵等^[15]提出一种基于统计特征和 PolInSAR 相位优化算法的反演算法, 并实验证明了该算法的可行性和优越性。

使用极化干涉 SAR 数据进行植被高度反演已有近 20 年历史, 但是仍有许多问题需要解决, 各种算法都有其优点和不足之处, 本文在分析常用的极化干涉 SAR 植被高度反演模型与算法基础上, 利用仿真数据进行了对比分析, 并对这些方法的适用条件和优缺点进行了归纳和总结, 同时指出可研究的方向, 对如何选取基于极化干涉 SAR 的植被高度反演算法具有一定的参考价值。

1 极化干涉 SAR 植被高反演算法

目前基于极化干涉 SAR 进行树高反演的算法主要有数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 差分算法、RVoG 地相位反演算法、复相干幅度反演算法、相位与相干幅度联合反演算法等。

1.1 DEM 差分算法

根据干涉 SAR 干涉相位与高程的关系, 在远场景小区域条件下, 解缠后的干涉相位与地面高度之间存在着线性关系。因此, 地表上植被高度引起的干涉相位可以通过计算植被顶层干涉相位中心与植被底层地表干涉相位中心的差值来确定。干涉相位差分法是一种传统的高度反演方法, 其基本思想是通过计算植被层相位中心和地表相位中心的差值, 提取植被高度。在极化干涉 SAR 测量获得的数据中, 对植被层进行分析, 植被层高度对应的干涉相位就是指植被相位中心 φ_v 和地表相位中心 φ_g 两个相位中心的差值。严格来讲, 该方法所得树高并非真实树高, 只是地物两散射中心的距离差, 该算法所得计算树高与真实树高之间存在一定误差。根据文献[3], 该算法公式为:

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

其中: ω_v 一植被冠层体散射矢量; $\tilde{\gamma}_{\omega_v}$ 一与 ω_v 相对应的冠层体散射复相干; ω_g 一地表散射矢量; $\tilde{\gamma}_{\omega_g}$ 一与 ω_g 相对应的地表散射复相干; k_z 一距离向谱滤波后的有效垂直干涉波数。

根据极化干涉信息先验知识, 一般认为 HV 极化散射为 ω_v , HH-VV 极化散射为 ω_g 。采用该方法反演植被高的关键, 是选择一个散射矢量 ω_g 即极化状态来准确估计地表相位。

1.2 RVoG 地相位反演算法

通过对大量的 L 和 P 波段散射数据的分析表明: 在利用干涉相位差分法反演树高时, 通常很难选择合适的散射矢量对地相位进行无偏估计^[8]。为了对地相位进行较为准确的估计, RVoG 地相位反演算法引入了 RVoG 散射模型, 通过模型的几何特点和所测复相干来综合确定地相位。

图 1 所示为 RVoG 模型, 该模型由 Trenuhalf 建立, 是森林高度反演算法的理论基础, 在忽略噪声去相关和时间去相关影响时, 根据文献[9], 可得公式:

$$\tilde{\gamma}(\omega) = \exp(j\varphi_0) \frac{\tilde{\gamma}_v + m(\omega)}{1 + m(\omega)} \quad (2)$$

其中： j —影像中执行该公式的像元的列号； $m(\omega)$ —有效地体幅度比率，是一个极化函数； $\tilde{\gamma}_v$ —纯体去相关系数。

$$\tilde{\gamma}_v = \frac{2\sigma(\exp(2\sigma h_v / \cos\theta + ik_z h_v) - 1)}{(2\sigma + ik_z \cos\theta)(\exp(2\sigma h_v / \cos\theta) - 1)} \quad (3)$$

其中： φ_0 —与地形有关的相位； θ —参考入射角； k_z —距离向谱滤波后的有效垂直干涉参数； i —影像中执行该公式的像元的行号。

由公式(2),(3)可知,有效散射中心的位置是森林植被高度 h_v ,消光系数 σ 和地体幅度比 $m(\omega)$ 的函数。由此可推得森林植被高度 h_v 的公式为:

$$h_v = \frac{\arg(\tilde{\gamma}_{\omega_v}) - \tilde{\varphi}}{k_z} \quad (4)$$

其中： $\tilde{\varphi}$ —地面相位,计算公式为:

$$\tilde{\varphi} = \arg(\tilde{\gamma}_{\omega_v} - \tilde{\gamma}_{\omega_s}(1 - L_{\omega_s})), 0 \leq L_{\omega_s} \leq 1, \quad (5)$$

$$AL_{\omega_s}^2 + BL_{\omega_s} + C = 0 \Rightarrow L_{\omega_s} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \quad (6)$$

$$A = |\tilde{\gamma}_{\omega_s}|^2 - 1, B = 2\text{Re}((\tilde{\gamma}_{\omega_v} - \tilde{\gamma}_{\omega_s}) \cdot \tilde{\gamma}_{\omega_s}), C = |\tilde{\gamma}_{\omega_v} - \tilde{\gamma}_{\omega_s}|^2. \quad (7)$$

其中： $\tilde{\gamma}_{\omega_v}$ —与植被冠层体散射矢量相对应的冠层体散射复相干； $\tilde{\gamma}_{\omega_s}$ —与地表散射矢量对应的地表散射复相干。

该算法同 DEM 差值算法的不同之处是基于散射模型来确定地相位。因为公式(4)代表了复平面内的一条直线,通过选择两个不同极化(散射)复相干(植被冠层复相干和地表复相干)来拟合该直线,从而确定地相位。该直线与复平面内单位圆的交点便是地相位。该方法的繁琐之处是拟合的直线与单位圆有两个交点,因此需要一定的判断准则来剔除其中之一。一般认为接近于地表的复相干距地相位更近。基于极化干涉先验,一般假设 HV 极化复相干为植被冠层体散射复相干,HH-VV 极化复相干为近地表散射复相干。RVoG 模型如图 1 所示。其中： h_v —森林植被高度； θ —参考入射角。

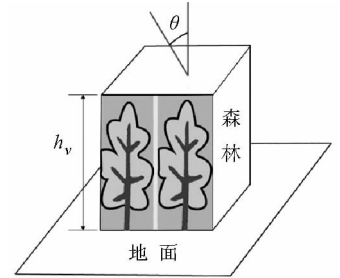


图 1 RVoG 散射模型

Fig.1 RVoG Scattering model

1.3 复相干幅度反演算法

在 RVoG 地相位反演算法中,地相位的估计是基于直线拟合和距离判断准则来确定的。该判断准则的缺点是应用于非常低的极化干涉复相干时,会引起判断模糊,难以识别地相位。在这种情况下,一种潜在的办法是完全忽略其相位信息^[16],直接利用复相干的幅度信息,根据文献^[16],可得式(8)。首先基于极化干涉信息的先验,选取合适的极化干涉复相干为植被体散射复相干;然后利用该复相干幅度与体散射模型复相干最优拟合来实现树高反演。当设定消光系数为零时,散射模型变为 sinc 函数,可通过公式(9)快速反演树高。本文选取 HV 极化干涉复相干为 $\tilde{\gamma}_{\omega_v}$,即植被体散射复相干。

$$\min_{h_v} L_1 = \left\| \tilde{\gamma}_{\omega_v} - \left| e^{j\tilde{\varphi}} \frac{P}{P_1} \frac{e^{P_1 h_v} - 1}{e^{P h_v} + 1} \right| \right\|, \quad (8)$$

$$h_v = \frac{2\text{sinc}^{-1}(|\tilde{\gamma}_{\omega_v}|)}{k_z}. \quad (9)$$

其中： $\tilde{\gamma}_{\omega_v}$ —与植被冠层体散射矢量相对应的冠层体散射复相干； h_v —植被高度； k_z —距离向谱滤波后的有效垂直干涉参数, $k_z = \frac{4\pi\Delta\theta}{\lambda \sin\theta} \approx \frac{4\pi B_n}{\lambda H \tan\theta}$ ； i —影像中执行该公式的像元的行号； j —影像中执行该公式的像元的列号； B_n —基线的法量； $P = \frac{2\sigma}{\cos\theta}$ ； $P_1 = P + ik_z$ 。

1.4 相位与相干幅度联合反演算法

在利用传统的植被高度反演方法进行反演时,单一的复相干幅度信息和相位信息都很容易受到植被消光系数和垂直结构的影响,从而导致树高估计不准,因此可以考虑将 DEM 差值算法与 sinc 幅度反演算法相结合来进行树高反演,根据文献[10]可知公式(10)。通过选择合理的 ϵ ,利用幅度信息来补充 DEM 差值算法的不足,以期提高反演的精度。

$$h_v = \frac{\arg(\tilde{\gamma}_{\omega_v}) - \tilde{\varphi}}{k_z} + \epsilon \frac{2 \cdot \text{sinc}^{-1}(|\tilde{\gamma}_{\omega_v}|)}{k_z} \quad (10)$$

其中: ϵ —权重系数。

1.5 四种反演算法对比

1)DEM 差分算法:优点是原理简单,计算量小;缺点是反演结果严重低于植被实际高度,反演精度较低;实际应用中可靠性较低,现在已经很少使用该方法。

2)RVoG 地相位反演算法:优点是采用了 RVoG 散射模型,通过模型几何特点和复相干来确定地相位,精度比 DEM 差分算法有所提高;缺点是该算法在使用模型对地表相位中心进行纠正时,没有对植被散射相位进行相应纠正,导致相关系数较低,反演精度也不很理想;该方法适于在地势平坦、植被高度比较均匀、植被种类单一的地区应用,这样可以减小地体幅度比和植被高对相关系数的影响,从而提高反演精度。

3)复相干幅度反演算法:优点是进行植被高度反演中,可以通过设置合适的校正系数选择最优拟合,通过较少的迭代次数实现植被高反演;缺点是该方法会出现一定的系统高估现象,总的来说还是能得到相对满意的结果;该方法不适合对低矮植被地区进行高度反演,只适用于较高植被区。

4)相位与相干幅度联合反演算法:优点是通过一定的系数将相位与幅度方法联合起来,保证反演出的植被高为正值,而且反演出的结果比较集中,稳定性较高;缺点是反演的平均植被高略低于真实植被高度,还要做进一步的改进和优化,从而使结果更理想;该方法实验结果的好坏与 ϵ 的选择密切相关,适用范围较广,不易受植被高低的影响,但是也不适用于植被类型较复杂的地区。

2 仿真实验分析

利用 PolSARpor 进行仿真实验,模拟数据的参数为:雷达平台高度 3 000 m,水平基线 10 m,垂直基线 1 m,入射角 45° ,中心频率 1.3 GHz,平均树高是 18 m,方位分辨率为 1.5 m,斜距分辨率为 1.060 7 m。模拟数据如图 2 所示,中间圆形区域是高度为 18 m 的植被覆盖区域,其他区域为非植被覆盖的地表,图 3 为模拟数据的干涉图,图 4 为四种反演算法反演的植被高度三维图,图 5 为四种反演算法反演的植被高度统计图。

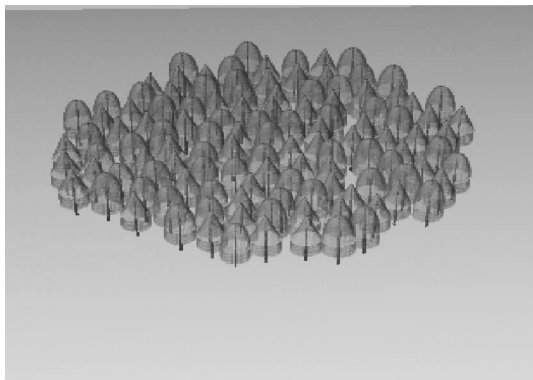


图 2 模拟数据图

Fig. 2 Analog data diagram

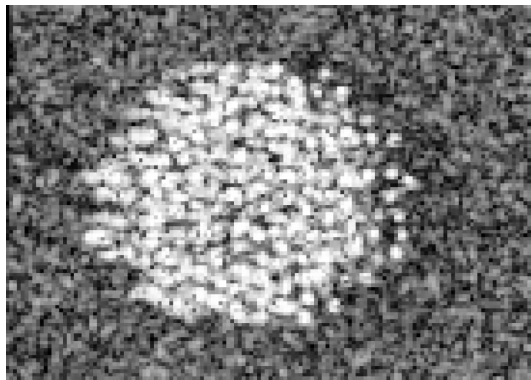


图 3 模拟数据的干涉图

Fig. 3 The interferogram of simulation data

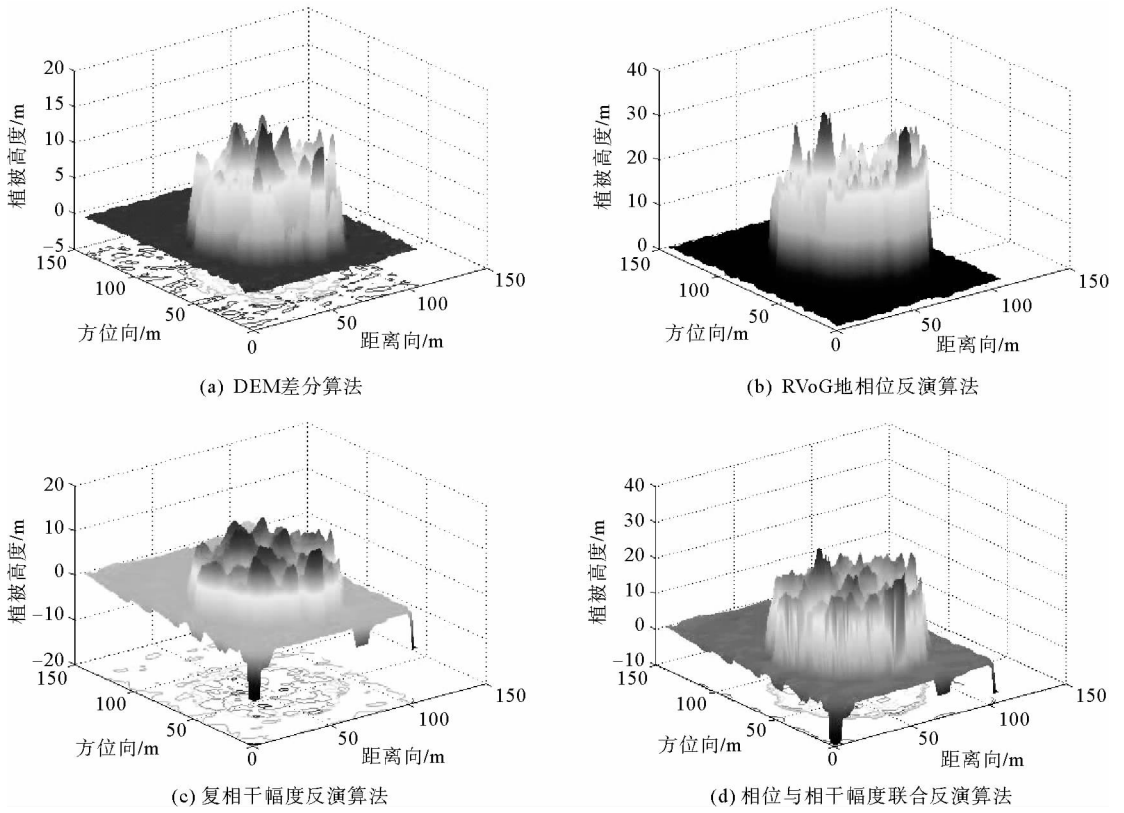


图 4 四种反演算法反演的植被高度三维图

Fig. 4 Vegetation height 3D map of four kinds of inversion algorithms

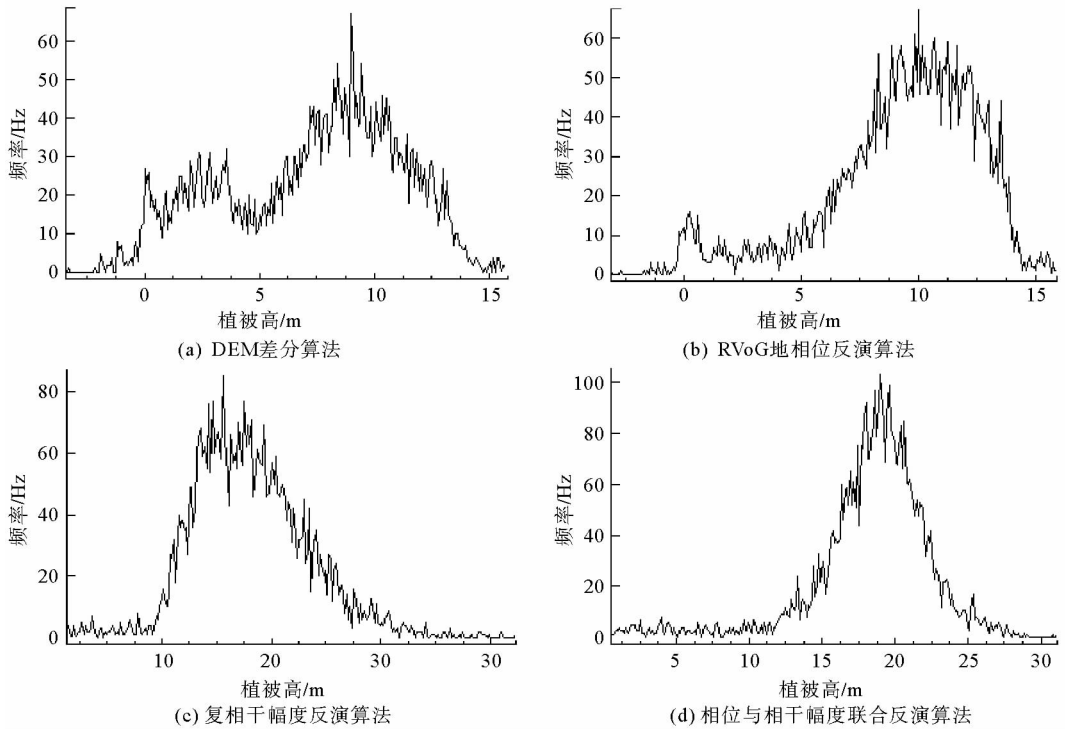


图 5 四种反演算法反演的植被高度统计图

Fig. 5 Vegetation height statistical charts of four kinds of inversion algorithms

利用最小值、最大值、均值和标准差四种指标,对上述四种植被高度反演算法反演出的植被高的统计估计进行分析,其结果如表 1 所示。

表 1 各方法的四种指标对比

Tab.1 The contrast of four index methods

m

植被高反演方法	最小值	最大值	均值	标准差
DEM 差分反演	-3.450 097	15.804 905	7.385 028	3.817 083
RVoG 地相位反演	-3.153 096	15.903 995	9.437 958	3.163 707
复相干幅度反演	1.415 827	42.311 451	18.289 116	5.217 069
相位与相干幅度联合反演	0.693 992	31.102 867	18.582 516	3.869 658

由表 1 可以看出,由于 DEM 差分反演和 RVoG 地相位反演中地表散射中心的选择问题,导致反演出的植被高度有部分负值,最大值与 18 m 相距甚远,而且得到的平均值也与模拟数据中设置的 18 m 相差甚远。复相干幅度反演算法反演的植被高没有负值,但最大值却远大于 18 m,平均值接近 18 m,而且标准差较大,说明此种方法反演的植被高相差太大;相位与相干幅度联合反演的方法能保证反演的植被高都是正值,虽然最大值大于 18 m,但均值在 18 m 附近,而且标准差也较小,符合植被高度反演的要求。因此,在利用极化干涉 SAR 数据植被高度反演的过程中,通常应用相位与相干幅度联合反演的方法。

3 结论

由于只考虑了植被和地表的散射中心,忽略了植被内部的散射过程,而直接将散射中心和植被高度等同,因此 DEM 差分法生成的高度也只是有效植被高度,往往比实际高度要低;RVoG 相位算法与 DEM 模型相比有所改进,但其相关系数较低,因为模型纠正地表相位中心的同时,植被散射相位却没有得到相应纠正,导致其相关程度降低;当相干幅度一定时,复相干幅度反演方法:反演结果理论上应该偏低,但实际上会出现高估现象,这是由于干涉相干存在着非体散射去相干的影响,而在求取森林高度的计算中,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,且这种方法对消光系数和植被垂直结构变化敏感,稳健性差;相位与相干幅度联合反演方法可以通过选择合适的权重系数,保证反演出来的植被高均为正值,而且得到精度较高的反演结果。

极化干涉 SAR 植被高度反演算法研究涉及了相干系数最优化、极化散射特性、目标相干散射模型以及各种精确参数估计理论等很多方面的内容,本文介绍了几种常用算法,但该领域中还存在若干问题有待进一步研究,比如:更准确的实际地物散射模型的研究,目前的 RVoG 模型只适用于植被有定向结构、植被类型单一且分布均匀的地区,造成了反演算法使用的局限性,并影响了结果的准确性;高精度地物多种参数反演方法的研究;多基线多波段融合的极化干涉 SAR 植被高度反演算法的研究;以及极化干涉 SAR 系统的研制等。随着研究的深入和理论不断完善,植被高度反演算法也会更加高效,反演结果会更稳健,精度也会更高。

参考文献:

[1]Treuhaft R N,Madsen S N,Moghaddam M,et al. Vegetation characteristics and underlying topography from interferometric radar[J]. Radio Science,1996,33:1449-1485.
 [2]Treuhaft R N,Siqueira P R. Vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar[J]. Radio Science,2000,35:141-177.
 [3]Cloude S R,Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1998,36:1551-1565.
 [4]Yamada H,Yamaguchi Y,Rodriguez E,et al. Polarimetric SAR interferometry for forest Canopy analysis by using the super-resolution method[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium. New York:IEEE Computer Society,2001:1101-1103.
 [5]Guillaso S,Famil L F,Reigber A,et al. Polarimetric interferometry SAR data analysis based on ESPRIT/MUSIC methods

- [C]//Proceedings of the Workshop on PolInSAR-Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry, Paris; ESA SP-529, 2003; 32-37.
- [6] Yamada H, Sato K, Yamaguchi Y, et al. Interferometric phase and coherence of forest estimated by ESPRIT-based polarimetric SAR interferometry[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toronto, 2002; 829-831.
- [7] Cloude S R, Papathanassiou K P. A 3-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry[C]//2002 4th European Conference on Cologne, Berlin; European Conference on Synthetic Aperture Radar, 2001; 279-282.
- [8] Cloude S R, Papathanassiou K P. Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry[J]. IEEE Proceedings Radar Sonar and Navigation, 2003, 150(3): 125-134.
- [9] Tabb M, Flynn T, Carande R. Full Maximum likelihood inversion of PolInSAR scattering models[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium. New York; IEEE Computer Society, 2004; 1232-1235.
- [10] Cloude S R. POL-InSAR training course[R]. New York; American Geophysical Union (AGU), 2005; 14-16.
- [11] 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, 2005, 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, 2005, 15(7): 79-84.
- [12] Chen E X, Li Z Y, Mette T, et al. Case study of factors affecting tree height inversion performance using SIR-C/X polarimetric interferometric SAR data of hetian test site in China[C]//Proceedings 2005 Dragon symposium-Dragon Programme Mid-Term Results. Paris; ESA SP-611, 2005; 259-268.
- [13] Cloude S R, Papathanassiou K P. Forest vertical structure estimation using coherence tomography[C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium, New York; IEEE Computer, 2008; 275-278.
- [14] Luo H M, Chen E X, Cheng J A, et al. Forest height estimation methods using polarimetric SAR interferometry[J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(4): 806-821.
- [15] 陈兵, 徐绍剑, 张平. 单基线 PolInSAR 反演算法研究[J]. 电子信息学报, 2008, 30(7): 1744-1746.
- Chen Bing, Xu Shaojian, Zhang Ping. Research on the single-baseline PolInSAR inversion algorithms[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(7): 1744-1746.
- [16] Cloude S R. POL-InSAR training course[R]. San Francisco; American Geophysical Union (AGU), 2005; 14-16.

(责任编辑:高丽华)