

· 通信与信息工程 ·

结合相干系数的极化干涉SAR植被高度估计方法研究

张晓玲, 韦顺军, 韩迪

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】阐述了极化干涉SAR成像技术的基本理论,分析了极化干涉SAR的植被散射模型和Cloude三阶段植被高度反演算法。因三阶段法采用多参数初值迭代求解方法,其运算量较大复杂性高,该文提出基于相干系数的高度估计方法。先用干涉相位估计植被高度,再由相干系数幅度估计植被高度对前面相位估计的高度进行补偿,既保证了一定植被高度估计精度,又大大减少了反演算法的运算量,最后用极化干涉SAR仿真数据验证了该方法的有效性。

关键词 极化干涉SAR; 合成孔径雷达; 植被高度估计; 植被散射模型

中图分类号 TN959.3

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.03.001

Vegetation Height Inversion Algorithms Based on the Coherence of Polarimetric Interferometric SAR

ZHANG Xiao-ling, WEI Shun-jun, and HAN Di

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract Basic theory of polarimetric synthetic aperture radar (SAR) interferometry is expatiated and the PolInSAR vegetation scattering model and Cloude three-stage vegetation height inversion algorithm are analyzed. The calculation of the three-stage algorithm is complex as it adopts initial value iterative. The paper introduces a method to combine the vegetation height estimation by the coherence coefficient amplitude and phase. This method not only keeps the precision of vegetation height estimation but also reduces the calculation of the algorithm greatly. Finally, the polarimetric SAR interferometry simulated data are used to validated the proposed method.

Key words PolInSAR; SAR; vegetation height estimation; vegetation scattering model

极化干涉合成孔径雷达(PolInSAR)成像技术是一种将极化SAR成像和干涉SAR成像测量技术有效结合的新型遥感成像技术,其既有干涉SAR对地表植被散射体的空间分布和高度敏感特性,同时又具有极化SAR对植被散射体的形状和方向敏感特性。因此,极化干涉SAR在地表植被参数提取比单独的干涉SAR和极化SAR具有更高的精度,利用极化干涉SAR进行森林储蓄量估计和监测已经成为当前国外的研究热点^[1-2]。

对于极化干涉SAR植被参数反演,文献[3-4]提出一种基于RvOG模型的三阶段植被参数反演算法。该算法利用复相干平面表示相干系数关系,通过最小二乘法优化对六维植被参数进行反演得到较准确的估计结果。但该算法要求至少一个通道的最小地体幅度比小于-10 dB,且复杂性高、运算量大,求解的过程容易出现病态结果^[5]。本文在RvOG两层模型的基础上,提出基于相干系数的高度估计方法。

1 极化干涉SAR基本理论

对于一个全极化干涉SAR系统,可获得两副天线的极化散射矢量 k_1 和 k_2 ,由两副天线不同视角获取的场景极化信息可以通过半正定极化干涉相干矩阵 T_6 来描述:

$$k_i = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH_i} + S_{VV_i}, S_{HH_i} - S_{VV_i}, 2S_{HV_i}]^T \quad i=1,2 \quad (1)$$

$$T_6 = \left\langle \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \end{pmatrix} (k_1^H \quad k_2^H) \right\rangle = \begin{bmatrix} T_{11} & \Omega_2 \\ \Omega_2^H & T_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $T_{11} = \langle k_1 k_1^H \rangle$; $T_{22} = \langle k_2 k_2^H \rangle$; $\Omega_2 = \langle k_1 k_2^H \rangle$; S_{HH_i} 、 S_{VV_i} 和 S_{HV_i} 为两副天线的极化散射矩阵元素。通过 3×3 复矩阵 T_{11} 、 T_{22} 和 Ω_2 即可以得到目标的全部极化信息^[6]。引入两个归一化的复向量 ω_1 、 ω_2 , ω_1 和 ω_2 理解为极化散射机制的推广^[7],同时定义两个散射系数 μ_1 、 μ_2 分别为:

$$\mu_1 = \omega_1^H \cdot k_1, \quad \mu_2 = \omega_2^H \cdot k_2 \quad (3)$$

收稿日期: 2008-03-05; 修回日期: 2008-09-17

基金项目: 部级项目

作者简介: 张晓玲(1964-),女,教授,博士生导师,主要从事SAR成像方面的研究。

式中 μ_1 、 μ_2 表示向量 \mathbf{k}_1 、 \mathbf{k}_2 在 $\boldsymbol{\omega}_1$ 、 $\boldsymbol{\omega}_2$ 上的投影。涉及到散射机制 $\boldsymbol{\omega}_1$ 和 $\boldsymbol{\omega}_2$ 的干涉图为：

$$\mu_1 \mu_2^* = (\boldsymbol{\omega}_1^H \mathbf{k}_1)(\boldsymbol{\omega}_2^H \mathbf{k}_2) = \boldsymbol{\omega}_1^H \boldsymbol{\Omega}_2 \boldsymbol{\omega}_2 \quad (4)$$

相应的极化散射干涉相位为：

$$\phi(\boldsymbol{\omega}_1, \boldsymbol{\omega}_2) = \arg(\boldsymbol{\omega}_1^H \boldsymbol{\Omega}_2 \boldsymbol{\omega}_2) \quad (5)$$

任意选择散射机制向量 $\boldsymbol{\omega}_1$ 和 $\boldsymbol{\omega}_2$ ，可以推出极化干涉复相干系数的一种普遍表达式为：

$$\tilde{\gamma}(\boldsymbol{\omega}_1, \boldsymbol{\omega}_2) = \frac{\langle \boldsymbol{\omega}_1^H \boldsymbol{\Omega}_2 \boldsymbol{\omega}_2 \rangle}{\sqrt{\langle \boldsymbol{\omega}_1^H \mathbf{T}_{11} \boldsymbol{\omega}_1 \rangle \langle \boldsymbol{\omega}_2^H \mathbf{T}_{22} \boldsymbol{\omega}_2 \rangle}} \quad (6)$$

在一些特殊情况下散射机制 $\boldsymbol{\omega}_1$ 和 $\boldsymbol{\omega}_2$ 的取值为： $\boldsymbol{\omega}_1 = \boldsymbol{\omega}_2 = (0.707 \ 0.707 \ 0)^T$ ，得到单极化HH干涉信息； $\boldsymbol{\omega}_1 = \boldsymbol{\omega}_2 = (0.707 \ -0.707 \ 0)^T$ ，得到单极化VV干涉信息； $\boldsymbol{\omega}_1 = \boldsymbol{\omega}_2 = (0 \ 0 \ 1)^T$ ，得到单极化HV干涉信息。改变 $\boldsymbol{\omega}_1$ 和 $\boldsymbol{\omega}_2$ 的值，即可以得到任意极化组合对应的复相干系数。

2 植被散射模型

极化干涉SAR技术已经广泛应用于地表植被参数反演的研究，因此植被散射模型的建立是植被参数反演算法最关键的部分。植被散射模型既要尽量简化又要符合实际的物理结构特征。

随机体散射模型(RvoG)描述了地表上层厚度为 h_v 的随机分布的植被层覆盖模型^[6]，该模型已成功用于极化干涉SAR地表参数反演，其两层模型如图1所示，参考面高度 z 为零，地表高度用 z_0 表示， θ 为雷达波入射角。

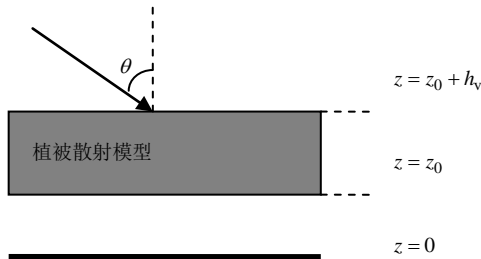


图1 随机散射两层模型

根据散射模型，复相干系数可表示为：

$$\gamma(\boldsymbol{\omega}) = e^{j\phi_0} \left(\gamma_v + \frac{\mu(\boldsymbol{\omega})}{1 + \mu(\boldsymbol{\omega})} (1 - \gamma_v) \right) \quad (7)$$

式中 ϕ_0 为地表相位； γ_v 为体散射相干系数； μ 为给定极化状态组合下的地体幅度比，当 μ 趋于无穷大时表现为表面散射。

3 植被高度估计算法

在极化干涉SAR地表随机体模型(RvoG)中，植被体散射复相干系数 γ_v 由植被厚度 h_v 和平均衰减

系数 σ 决定^[9]，表示为：

$$\gamma_v(h_v, \sigma) = \frac{\int_0^{h_v} e^{2\sigma x / \cos \theta} e^{ik_z x} dx}{\int_0^{h_v} e^{2\sigma x / \cos \theta} dx} = \quad (8)$$

$$\frac{2\sigma(e^{(2\sigma h_v / \cos \theta + ik_z h_v)} - 1)}{(2\sigma + ik_z \cos \theta)(e^{2\sigma h_v / \cos \theta} - 1)} \quad (9)$$

$$k_z \approx \frac{4\pi B_p}{\lambda R \sin \theta}$$

式中 k_z 为有效垂直波数； B_p 为有效垂直基线； λ 为入射波长； R 为主天线到场景对应点的斜距。对于极化干涉SAR植被区域成像，三阶段反演法利用相干系数观测值的直线拟和获得地表相位估计 ϕ_0 后，植被高度参数即可通过最小化观测值和模型之间的误差完成，其观测相干系数 $\gamma(\boldsymbol{\omega})$ 通常选择体散射占优的极化状态(如HV)：

$$\min_{h_v, \sigma} L(h_v, \sigma, \boldsymbol{\omega}) = \|\gamma(\boldsymbol{\omega}) - e^{j\phi_0} \gamma_v\| \quad (10)$$

式(10)可以利用两种方法得到未知量 h_v 和 σ ：初值迭代方法和查表法(LUT)。初值迭代方法计算量大且初值选取不当容易引起病态解，而查表法需要获取 h_v 和 σ 关系的先验信息，这两种求解方法都造成三阶段反演算法的复杂性。

在实际情况下，植被层平均衰减系数会造成植被高度均值明显偏低，可先假设电磁波在植被层无衰减，由相干系数幅度计算植被高度后再对相位中心差估计的植被高度进行补偿。当 σ 趋于零时相干系数 $\gamma_v(h_v, \sigma)$ 变化为只含一个变量的函数 $\gamma_v(h_v)$ ：

$$\gamma_v(h_v) = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \frac{2\sigma(e^{(2\sigma h_v / \cos \theta + ik_z h_v)} - 1)}{(2\sigma + ik_z \cos \theta)(e^{2\sigma h_v / \cos \theta} - 1)} \quad (11)$$

通过 $\gamma_v(h_v)$ 可反推出植被高度 h_{v1} ，而对于体散射相干系数 γ_v ，其通常可以用体散射占优的交叉极化干涉系数观测值 γ_{HV} 近似。由Cloude三阶段法相干系数拟和精确估计植被层下的地表相位 ϕ_0 ，通过干涉相位差可得到植被层的高度 h_{v2} 为：

$$h_{v2} = \frac{\phi_{HV} - \phi_0}{k_z} \quad (12)$$

由于植被层相位中心一般都是对应于树冠层中心而不是树峰，干涉相位差高度估计也往往严重低估植被高度。因此，将两种高度结果结合得到植被高度 h_v 为：

$$h_v = h_{v1} + h_{v2} \quad (13)$$

三阶段法需要两次迭代，其运算量大约为 $N_r N_a N_h N_\sigma d$ 。本文方法直接估计出两个高度而不需要进行两次迭代，其运算量大约为 $N_r \times N_a \times 2 \times d$ 。

其中, N_r 和 N_a 分别为距离向和方位向分辨单元数; N_h 和 N_o 分别为高度和平均衰减系数的搜索迭代次数; d 为一个分辨单元直接植被高度所需的计算量。即相对于三阶段法, 本文的方法明显减少了算法的运算量。

4 试验结果和分析

仿真数据是由欧洲航空局发布的Polsarpro极化SAR处理软件模拟器生成的^[10]。仿真区域为具有一定粗糙度的平坦地面, 地面上是一片落叶树林位于图像的中心区域, 树林中包含有17棵树。系统中心频率 $f_0 = 1.3 \text{ GHz}$, 入射角度 $\theta = 30^\circ$, 飞机平台高度 $H = 3000 \text{ m}$, 水平基线 $B_h = 10 \text{ m}$, 垂直基线 $B_v = 1 \text{ m}$, 方位向精度 $\rho_a = 1.5 \text{ m}$, 斜距向精度 $\rho_r = 1.06 \text{ m}$, 树高 $h_v = 18 \text{ m}$ 。提取主天线极化信息, 得到如图2所示的span极化功率图。

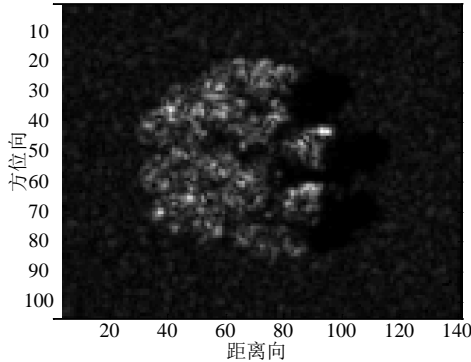


图2 主天线span功率图

当电磁波在植被层中的平均衰减系数近似为零时, 通过式(10)可得到植被高度和相干幅度的关系, 如图3所示。植被高度越大, 极化干涉相干系数越小。

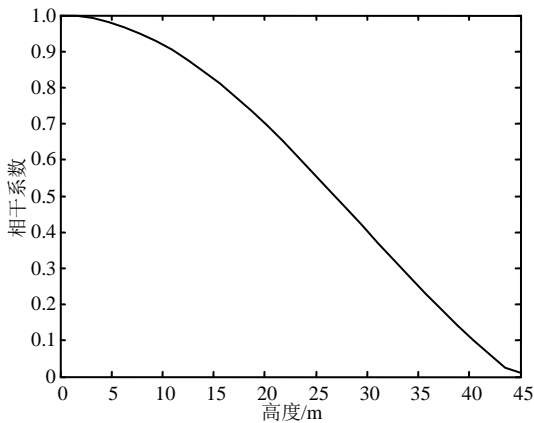


图3 相干系数与高度关系图

提取仿真数据三种极化复相干系数 γ_{HH} 、 γ_{HV} 和 γ_{VV} , 通过三阶段反演方法中相干直线拟和估计出地表相位 ϕ_0 , 运用三阶段反演算法生成的植被高度如图4所示。选择交叉极化相干 γ_{HV} 作为植被体相干

γ_v 的近似, 用相干幅度和相位结合的方法估计的植被高度如图5所示。

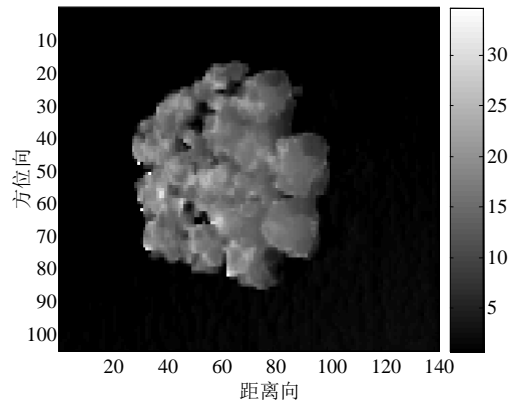


图4 三阶段法植被高度图

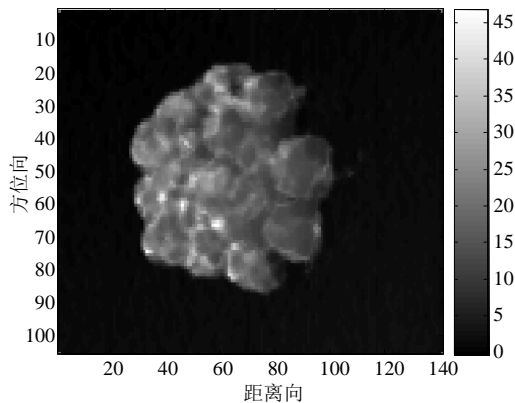


图5 相位与幅度结合估计高度图

对两种方法估计得到的植被高度进行统计, 得到植被区域的高度直方图如图6所示。三阶段反演算法和相位幅度算法估计的植被高度中心都约为 16 m, 即两种算法估计精度相近, 都能较好地反演植被高度。对于直方图峰值中心三阶段法高度偏差较小, 而相位幅度法高度偏差较大, 这是由于相位幅度法将两个估计高度直接相加, 造成一些相干性较差的分辨单元植被高估引起的。

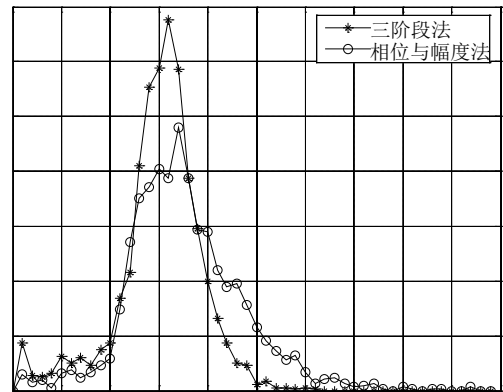


图6 植被高度直方图

在仿真试验中,三阶段反演算法估计每个分辨单元植被高度所需的搜索迭代次数 N_h 和 N_σ 分别为 30 和 10 次,而本文方法只需直接计算复相干系数的相位和幅度所对应的植被高度,三阶段反演算法所需的运算量大约为本文方法的 $N_h N_\sigma / 2$ 倍,即本文方法在试验中明显地减少了地表植被高度反演的运算量。

5 结 论

本文在RvoG两层模型的基础上,提出基于相干系数的植被高度估计方法,该方法先用干涉相位估计植被高度,再由相干系数幅度估计植被高度。试验证明该方法具有较好的植被高度估计精度,又大大减少了反演算法的运算量,为植被区域快速三维成像和森林监测提供了一种可行的方法。

参 考 文 献

- [1] 吴一戎,洪文,王彦平.极化干涉SAR的研究现状与启示[J].电子信息学报,2007,29(5):1258-1262.
WU Yi-rong, HONG Wen, WANG Yan-ping. The current status and implication of polarimetric SAR interferometry[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29(5): 1258-1262.
- [2] 邹斌,张腊梅,孙得明,等.极化干涉合成孔径雷达图像信息提取技术的进展及未来[J].电子信息学报,2006,28(10):1978-1984
ZOU Bin, ZHANG La-mei, SUN De-ming, et al. Information extraction using polarimetric interferometric SAR data: Present and future[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2006, 28(10): 1978-1984.
- [3] CLOUDE S R, PAPATHANASSIOUS K P. Three stage inversion process for polarimetric SAR interferometry[J]. IEE Proc Radar Sonar Navigation, 2003,150(3): 125-134.
- [4] CLOUDE S R, PAPATHANASSIOU K P. Polarimetric SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1551-1655.
- [5] CHEN Xi, WANG Chao, ZHANG Hong. Robust forest height extraction using polarimetric SAR interferometry [C]//ICARSS 2007. Barcelona: IEEE International, 2007: 1603-1606.
- [6] PAPATHANASSIOU K P, CLOUDE S R. Single baseline polarimetric SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11): 2352-2363.
- [7] 郭华东,李新武,王长林,等.极化干涉雷达遥感机制及作用[J].遥感学报,2002,6(6):401-405.
GUO Hua-dong, LI Xin-wu, WANG Chang-lin, et al. The mechanism and role of polarimetric SAR interferometry[J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(6): 401-405.
- [8] KUGLER F, PAPATHANASSIOU K P, Hajnsek I. Forest height estimation in tropical rain forest using PolInSAR techniques[C]//ICARSS 2006. Denver, USA: IEEE International, 2006: 2193-2196.
- [9] PAPATHANASSIOU K P, CLOUDE S R, LISENO A, et al. Forest height estimation by means of polarimetric SAR interferometry: Actual status and perspectives[C]// Proceeding of 2nd ESA PolInSAR Workshop. Frascati, Italy: IEEE International, 2005: 1124-1128.
- [10] MORCIRA A. PolSARProSim[EB/OL]. [2007-08-20]. <http://earth.esa.int/polsarpro/default.html>.

编辑 漆蓉