

单基线 PolInSAR 反演算法研究

陈兵^{①②} 徐绍剑^{①②} 张平^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 极化干涉合成孔径雷达(PolInSAR)测量是一种集极化雷达(PolSAR)和干涉雷达(InSAR)测量技术于一体的新的对地观测技术,利用极化干涉雷达数据反演地表植被参数特别是森林的垂直结构参数是当前极化干涉研究的热点问题。经典的单基线 PolInSAR 反演算法是 Cloude 和 Papathanassiou 提出的三阶段反演算法,但是该算法在相干值估计、直线拟合和散射体去相干估计等方面都存在着误差,直接影响反演精度。该文提出了一种新的基于统计特征和 PolInSAR 相位最优化算法的反演算法,并采用 PolInSAR 模拟数据验证了该算法的有效性。

关键词: 极化干涉 SAR; 反演; 单基线

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)07-1744-03

Research on the Single-Baseline PolInSAR Inversion Algorithms

Chen Bing^{①②} Xu Shao-jian^{①②} Zhang Ping^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Polarimetric Interferometric SAR (PolInSAR) is a new advanced technique recently based on measurement techniques of polarimetric SAR and interferometric SAR, and making use of PolInSAR data for retrieving the vertical structure parameters of the vegetation layer becomes the hot research topic of the PolInSAR at present. The most useful Single-baseline PolInSAR inversion algorithm is the three-stage inversion algorithm, which was proposed by Cloude and Papathanassiou, but this algorithm has the errors on the its three aspects: coherence estimation, line fitting and volume coherence estimation, and this errors straightly effect the inversion precision. This paper proposes a new inversion algorithm based on the statistic characteristic and PolInSAR phase optimization algorithm, and takes the PolInSAR simulated data to prove the validity of this algorithm.

Key words: PolInSAR; Inversion; Single-baseline

1 引言

极化干涉合成孔径雷达(PolInSAR)测量是一种集极化雷达(PolSAR)和干涉雷达(InSAR)测量技术于一体的新的对地观测技术^[1]。雷达极化对植被散射体的形状和方向敏感,雷达干涉对植被散射体的空间分布和高度很敏感。极化干涉雷达既具有干涉雷达对地表植被散射体的空间分布和高度很敏感的特性,同时又具有极化雷达对植被散射体的形状和方向很敏感的特性,因此,极化干涉雷达在提取地表植被垂直结构信息方面具有比单独的干涉和极化雷达有更大的优越性和更高的精度。用极化干涉雷达数据反演地表植被参数特别是森林的垂直结构参数是当前极化干涉研究的热点问题^[2]。

对于单基线 PolInSAR 反演, Cloude 和 Papathanassiou^[3]提出了三阶段植被参数反演算法,它将反演过程分为相干值估计、最小二乘直线拟合和体去相关估计 3 个阶段。相干值

估计由于集平均窗口大小的不确定性存在一定的偏差,以及直线拟合方法本身拟合误差,直接影响地表相位的反演精度;而体去相关的估计受到在观测的极化通道内至少有一个通道的地体幅度比值小于-10dB 的条件限制,在实际数据处理中,该条件的苛刻性给体去相关估计引入误差。因此,这些误差直接影响了植被参数的反演精度。

本文提出了一种新的基于统计特征和 PolInSAR 相位最优化算法的两阶段反演算法;基于统计特征反演地表相位的方法避开了相干估计的有偏性和直线拟合误差的限制,可以快速地反演地表相位; PolInSAR 相位最优化算法可以在所观测数据的极化状态空间中寻求一组极化状态组合,使其产生的干涉复图像对的相干值相位偏离地表相位最远,利用该相干值和地表相位估计值即可获取单基线 PolInSAR 体去相关最优估计,提高体去相关的估计精度,从而提高植被参数的反演精度。

2 基于统计特征的地表相位估计

全极化雷达系统测量的是每个像元的 2×2 复散射矩阵,

为方便对干涉相位和相干性表达,使用相干散射矢量 \mathbf{k} , 它等同于散射矩阵的矢量化, 即

$$\mathbf{k}_i = [S_{iHH}, S_{iHV}, S_{iVV}]^T$$

则其相关矩阵 $\hat{\mathbf{R}}$ 为

$$\hat{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_1 & \\ & \mathbf{k}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{k}_1^H & \mathbf{k}_2^H \\ & \mathbf{k}_2^H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{11} & \mathbf{\Omega}_{12} \\ \mathbf{\Omega}_{12}^H & \mathbf{T}_{22} \end{bmatrix}$$

该矩阵服从复 Wishart 分布, 其概率密度函数为^[4]

$$p(\hat{\mathbf{R}}; \mathbf{R}, n) = c(\hat{\mathbf{R}}) \exp(-n \text{tr}(\mathbf{R}^{-1} \hat{\mathbf{R}})) (\det \mathbf{R}^{-1})^n$$

则相应的似然函数为

$$f(\mathbf{R}) = -\log |\mathbf{R}| - \text{tr}(\mathbf{R}^{-1} \hat{\mathbf{R}}) \quad (1)$$

其中 \mathbf{R} 为含有待反演植被参数散射模型相关矩阵, $\hat{\mathbf{R}}$ 为实测数据获取的相关矩阵。故 PolInSAR 反演问题可以转化为利用最大似然估计方法估计植被参数。

Tabb 对该方法进行了深入研究^[5], 似然函数最终可化简为

$$f(\mathbf{R}) = 3 \lg(1 - \cos \theta) - \lg |\mathbf{A}_{\phi+\theta}| - \lg a_{\phi 1} - 2 \lg(a_{\phi 2} + a_{\phi 3}) \quad (2)$$

在此, $\mathbf{A}_\alpha = \frac{\mathbf{T}_{11} + \mathbf{T}_{22}}{2} - \frac{1}{2} e^{j\alpha} \mathbf{\Omega}_{12}^H - \frac{1}{2} e^{-j\alpha} \mathbf{\Omega}_{12}$; $a_{\phi 1}$, $a_{\phi 2}$, $a_{\phi 3}$

分别为矩阵 \mathbf{A}_ϕ 的 3 个特征值, 其中 $a_{\phi 1}$ 为最大特征值; ϕ 为待估计地表相位, θ 为与植被参数相关的参数。

利用已知数据 \mathbf{T}_{11} , \mathbf{T}_{22} 和 $\mathbf{\Omega}_{12}$, 采用查表(Look Up Table, LUT)方法可快速求得地表估计相位 $\hat{\phi}$ 。

3 基于 PolInSAR 相位最优化算法的体去相关估计

PolInSAR 相位最优化算法就是在所观测数据的极化状态空间中寻求一组极化状态组合, 使其产生的干涉复图像对的相干值相位偏离地表相位最远, 利用该相干值和地表相位估计值即可获得单基线 PolInSAR 体去相关最优估计。

由于该算法只对相位进行处理, 故干涉相干可简化为 $\gamma = \omega^H \mathbf{\Omega}_{12} \omega$ 。在此利用正切函数来衡量相位角的大小, 故需将相位角 $\angle \mathbf{\Omega}_{12}$ 偏移到正切函数的主值区间 $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ 内, 即 $\hat{\gamma} = \omega^H \mathbf{\Omega}_{12} \exp(j\varphi) \omega$, 其中 $\varphi = -\angle \text{trace}(\mathbf{\Omega}_{12})$ trace 为矩阵的迹。

令 $\hat{\mathbf{\Omega}}_{12} = \mathbf{\Omega}_{12} \exp(j\varphi)$, 则 $\hat{\gamma} = \omega^H \hat{\mathbf{\Omega}}_{12} \omega = B$, 故 $\tan \angle \hat{\gamma} = B_i / B_r$ 其中

$$B_i = \text{imag}(B) = \frac{1}{2j}(B - B^*) = \frac{1}{2j}(\omega^H \hat{\mathbf{\Omega}}_{12} \omega - \omega^T \hat{\mathbf{\Omega}}_{12}^* \omega^*)$$

$$B_r = \text{real}(B) = \frac{1}{2}(B + B^*) = \frac{1}{2}(\omega^H \hat{\mathbf{\Omega}}_{12} \omega + \omega^T \hat{\mathbf{\Omega}}_{12}^* \omega^*)$$

这里 ‘*’ 表示为共轭, 故由上述分析问题转化为求极化状态组合系数 ω 使 $\text{tg} \angle \hat{\gamma}$ 最大。可以利用拉格朗日乘子法求解。

此时拉格朗日函数 L 为

$$L = \omega^H \hat{\mathbf{\Omega}}_{12} \omega - \omega^T \hat{\mathbf{\Omega}}_{12}^* \omega^* + \lambda \left\{ j(\omega^H \hat{\mathbf{\Omega}}_{12} \omega + \omega^T \hat{\mathbf{\Omega}}_{12}^* \omega^*) - c \right\}$$

其中 c 为常数, λ 为引入的拉格朗日乘子。

$$\frac{\partial L}{\partial \omega^*} = \hat{\mathbf{\Omega}}_{12} \omega - \hat{\mathbf{\Omega}}_{12}^H \omega + \lambda \left\{ j(\hat{\mathbf{\Omega}}_{12} \omega + \hat{\mathbf{\Omega}}_{12}^H \omega) \right\} = 0$$

即

$$j(\hat{\mathbf{\Omega}}_{12} + \hat{\mathbf{\Omega}}_{12}^H)^{-1}(\hat{\mathbf{\Omega}}_{12} - \hat{\mathbf{\Omega}}_{12}^H) \omega = \lambda \omega \quad (3)$$

而

$$\lambda = \frac{\hat{\mathbf{\Omega}}_{12} \omega - \hat{\mathbf{\Omega}}_{12}^H \omega}{-j(\hat{\mathbf{\Omega}}_{12} \omega + \hat{\mathbf{\Omega}}_{12}^H \omega)} = \frac{\omega^H \hat{\mathbf{\Omega}}_{12} \omega - \omega^H \hat{\mathbf{\Omega}}_{12}^H \omega}{-j(\omega^H \hat{\mathbf{\Omega}}_{12} \omega + \omega^H \hat{\mathbf{\Omega}}_{12}^H \omega)} = -\tan \angle \hat{\gamma}$$

这样, 极值问题转化为矩阵的特征值问题。

由于 λ 与 $\tan \angle \hat{\gamma}$ 之间存在负号关系, 故将式(3)改为

$$-j(\hat{\mathbf{\Omega}}_{12} + \hat{\mathbf{\Omega}}_{12}^H)^{-1}(\hat{\mathbf{\Omega}}_{12} - \hat{\mathbf{\Omega}}_{12}^H) \omega = \lambda \omega \quad (4)$$

由式(4)可得: 最大特征值 λ_{\max} 和最小特征值 λ_{\min} 对应的特征向量 ω_1 和 ω_2 , 从而获取两相干值:

$$\gamma_1 = \frac{\omega_1^H \mathbf{\Omega}_{12} \omega_1}{\sqrt{\omega_1^H \mathbf{T}_{11} \omega_1 \omega_1^H \mathbf{T}_{22} \omega_1}}, \quad \gamma_2 = \frac{\omega_2^H \mathbf{\Omega}_{12} \omega_2}{\sqrt{\omega_2^H \mathbf{T}_{11} \omega_2 \omega_2^H \mathbf{T}_{22} \omega_2}}$$

比较 γ_1 、 γ_2 与 $\exp(j\hat{\phi})$ 距离远近来判断哪一组特征向量及其相干值为所求体散射去相干的单基线最优估计值。即

$$\hat{\gamma}_v = \begin{cases} \gamma_1 \exp(-j\hat{\phi}), & |\gamma_1 - \exp(j\hat{\phi})| > |\gamma_2 - \exp(j\hat{\phi})| \\ \gamma_2 \exp(-j\hat{\phi}), & |\gamma_2 - \exp(j\hat{\phi})| > |\gamma_1 - \exp(j\hat{\phi})| \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\hat{\phi}$ 为植被覆盖下的地表相位估计值, $\hat{\gamma}_v$ 即为体散射去相干的单基线最优估计值, 从而利用 LUT 方法反演植被参数, 至此完成了 PolInSAR 植被参数反演, 整个反演算法流程图如图 1 所示。

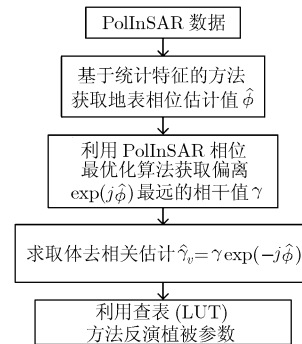


图 1 反演算法流程图

4 仿真分析

若采用实际系统的数据, 反演结果无法验证其精度, 故本文采用 PolInSAR 模拟数据进行仿真。PolInSAR 数据采用基于散射体模型的模拟方法^[6], 散射体模型采用 K.P.Papathanassiou 和 S.R.Cloudé 提出的随机散射体模型 (RVoG)^[7], 模型中植被参数如下: 植被衰减系数 $\sigma = 0.1\text{dB/m}$, 植被高度 $h_v = 10\text{m}$, 地表相位: $\phi = 0\text{rad}$, 植被

散射体及地表回波信号相关矩阵分别为 $\mathbf{T}_v = 0.2^* \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$,

$\mathbf{T}_g = \begin{bmatrix} 10 & -0.8 & 0 \\ -0.8 & 15.7 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$ 。对模拟数据利用基于统计特征的反

演方法根据式(2)估计地表相位 $\hat{\phi}$,同时利用 PolInSAR 相位最优化算法及所估计的 $\hat{\phi}$ 求取单基线 PolInSAR 体去相关最优估计 $\hat{\gamma}_v$,通过查表法(LUT)反演植被参数;同时采用基于统计特征(ML)的方法^[5]对该数据进行反演,两种算法反演结果比较如表1所示,反演植被高度结果比较如图2所示。

表1 反演结果比较

参数	模型初始值	本文提出的算法		ML 反演算法	
		反演均值	反演标准差	反演均值	反演标准差
σ (dB/m)	0.1	0.0796	0.0083	0.001	0
h_v (m)	10	10.284	0.2179	11.2640	0.1241
ϕ (rad)	0	-0.0054	0.0647	-0.0028	0.016

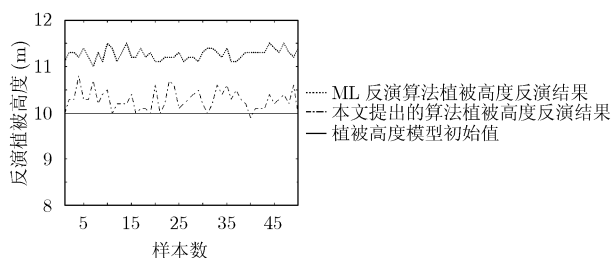


图2 植被高度反演结果比较

当地表回波信号相关矩阵不存在零特征值时,也就是说当地面各个极化通道回波信号均较强时,即各个极化通道地体幅度比均较大时,ML反演算法反演精度降低,由表1和图2得,植被高度反演精度较低,甚至对于植被衰减系数,ML反演算法失效;而本文提出的反演算法对于植被高度和衰减系数的反演精度均优于ML反演算法,从而验证了该算法的可行性和有效性。

5 结束语

Cloude 和 Papathanassiou 提出的三阶段植被参数反演算法在地表相位和体去相关估计都存在误差,再加上相干值有偏性的存在,大大影响植被高度的反演精度。本文提出了

基于统计特征和 PolInSAR 相位最优化算法的反演算法,避免了这些误差的存在,提高了反演精度。但是当地体幅度比较大时,也就是说当地面各个极化通道回波信号均较强时,即各个极化通道地体幅度比均较大时,植被体去相关估计误差较大,从而导致植被参数的反演精度较低,故该算法仍然无法摆脱单基线反演的弊端,因此,下一步工作将深入研究双基线 PolInSAR 反演算法。

参考文献

- [1] 王超,张红,刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量. 北京: 科学出版社, 第一版, 2002: 151-166.
 - [2] 杨震. 合成孔径雷达干涉与极化干涉技术研究. [博士论文], 中国科学院电子学研究所, 2003.
 - [3] Cloude S R and Papathanassiou K P. Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry. *IEE Proc-Radar Sonar Navigation*, 2003. 150(3): 125-134.
 - [4] Lee J S, Grunes M R, Ainsworth T L, Du L J, Shuler D L, and Cloude S R. Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex wishart classifier. *IEEE Trans. on Geoscience Remote Sensing.*, 1999, 37(5): 2249-2258.
 - [5] Tabb M, Flynn T, and Carande R. Full maximum likelihood inversion of polinsar scattering model. Proceeding of IGARSS'04, Alaska, USA, Sep 2004: 1232-1235.
 - [6] 陈兵, 张平. 基于散射体模型的 PolInSAR 数据模拟研究. 系统仿真学报 已录用, 待发表.
 - [7] Papathanassiou K P and Cloude S R. Single-Baseline polarimetric SAR interferometry. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(11): 2352-2363.
- 陈兵: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为干涉与极化干涉合成孔径雷达信号处理研究.
- 徐绍剑: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为伪码扩频信号合成孔径雷达.
- 张平: 男, 1949年生, 博士生导师, 研究方向为小卫星成像雷达的系统测控技术、系统总体设计及机载成像雷达新体制、新技术的研究工作.