

文章编号: 1007-4619 (2002)06-0424-06

航天飞机极化干涉雷达数据反演地表植被参数

李新武, 郭华东, 廖静娟, 王长林, 阎福礼

(中国科学院 遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室, 北京 100101)

摘要: 利用基于极化干涉测量的基本原理和相干散射模型, 提出了基于模拟加温-退火算法的极化干涉雷达数据地表植被参数的反演算法。首先, 对极化干涉测量的基本原理和一个考虑了地表和植被散射的二层相干散射模型进行了阐述。接着, 对模拟退火算法的基本理论和基于模拟加温-退火算法的地表植被参数反演模型进行了论述。最后, 利用和田地区 1994 年 10 月 9 日和 10 日的航天飞机 SIR-C L 波段单视散射矩阵复数据进行了地表植被参数反演的计算, 将反演结果与实测数据比较, 表明该反演算法能以较好的精度获取地表植被的高度。

关键词: 极化干涉; 相干散射模型; 模拟加温-退火算法; 参数反演

中图分类号: TP722.6/TP79 **文献标识码:** A

1 引言

陆地表面植被的垂直结构是描述生态系统的重要组成部分。垂直结构不仅包含了以垂直高度为函数的植被特征, 而且还涉及到植被覆盖下地表的地理特征。对以垂直高度为函数的植被特征的定量测量涉及到生物量、叶面积指数和植被类型的测定^[1]。森林的延续性和主要生产力的研究也受益于植被的垂直结构信息。一个复杂的垂直结构能够指示一个成熟或老化的森林比处于成熟阶段早期的森林缺乏生产力^[2,3]。垂直结构中树冠的遮蔽度也是生态系统动态的指示器, 包括光竞争和生物各类的竞争^[4]。因此, 植被的垂直结构能够模拟和监测生态变化。

极化干涉合成孔径雷达(Pol-InSAR)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^[5-7]。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提取地表植被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^[8-10]。

本文基于极化干涉测量的基本原理和相干散射模型, 提出了基于模拟加温-退火算法的极化干涉雷达数据地表植被参数反演算法。

2 极化干涉测量的基本原理和相干散射模型

2.1 极化干涉测量的基本原理

全极化雷达系统测量的是每个像元的 2×2 复散射矩阵 $[S]$, 为方便对干涉相位和相干性的表达, 使用相干散射矢量 \underline{k} , 它等同于散射矩阵 $[S]$ 的矢量化。如果媒质是互易的, 从相干散射矢量出发 \underline{k} , 则广义相干性的矢量表达式为^[5]

$$\gamma = \frac{|\langle \underline{\omega}_1^* \mathbf{T} [\underline{\Omega}_{12}] \rangle \underline{\omega}_2|}{\sqrt{\langle \underline{\omega}_1^* \mathbf{T} [T_{11}] \rangle \langle \underline{\omega}_2^* \mathbf{T} [T_{22}] \rangle}} \quad (1)$$

式中 $\underline{\omega}_1, \underline{\omega}_2$ 代表两种散射机制, $T_{11} = \langle \underline{k}_1 \underline{k}_1^* \mathbf{T} \rangle$, $T_{22} = \langle \underline{k}_2 \underline{k}_2^* \mathbf{T} \rangle$, $\underline{\Omega}_{12} = \langle \underline{k}_1 \underline{k}_2^* \mathbf{T} \rangle$, $\underline{k}_1, \underline{k}_2$ 分别是用作干涉的图像 1 和图像 2 的相干散射矢量。 T_{11} 和 T_{12} 是标准的 Hermitian 相干矩阵, 分别包含了图像 1 和图像 2 的全极化信息。 $\underline{\Omega}_{12}$ 不是 Hermitian 矩阵, 但是它包含了两幅图像的极化信息和干涉信息。由于相干

收稿日期: 2002-03-29; 修订日期: 2002-07-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(49989001), 国家 863 计划项目(2001AA132040)及中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-312)资助。

作者简介: 李新武(1973—), 男, 中国科学院遥感应用研究所博士生, 1999年毕业于中国地质大学应用地球物理专业。主要从事雷达遥感基础应用研究。已发表和接收论文 6 篇。

性对于极化的强烈依赖^[11],因此需要寻求式(1)在特定极化状态组合下的最优相干性,它归结为对式(1)的最优化问题,通过一定的变换,对式(1)的复 Lagrangian 函数 L 求最大值得到:

$$[T_{22}]^{-1}[\Omega_{12}]^*{}^T[T_{11}]^{-1}[\Omega_{12}] \omega_2 = \nu \omega_2 \quad (2)$$

$$[T_{11}]^{-1}[\Omega_{12}][T_{22}]^{-1}[\Omega_{12}]^*{}^T \omega_1 = \nu \omega_1 \quad (3)$$

式(2)和(3)归结为两个 3×3 复特征值问题,具有共同的特征值 $\nu = \lambda_1 \lambda_2^*$,这两个矩阵不是 Hermitian 的,但可以证明式(2)和(3)属于一个古典的 Hermitian 特征值问题,有实的非负特征值,矩阵的 3 个特征值 ν_1, ν_2, ν_3 与 3 个相干系数值 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 的关系为:

$$\gamma_1 = \sqrt{\nu_1}, \gamma_2 = \sqrt{\nu_2} \text{ 和 } \gamma_3 = \sqrt{\nu_3} \quad (4)$$

同时,方程(2)和(3)的矩阵产生了 3 个特征矢量对 $\{w_{1j}, w_{2j}\}, j=1,2,3$,代表 3 个最优散射机制^[12],散射矢量 k_1, k_2 在 w_{1j} 和 w_{2j} 上的投影产生两个最优的标量复图像 u_{1j} 和 u_{2j} ,它们形成的干涉图为:

$$u_{1j}u_{2j}^* = (\omega_{1j}^*{}^T k_1)(\omega_{2j}^*{}^T k_2)^*{}^T = \omega_{1j}^*{}^T[\Omega_{12}] \omega_2 \quad (5)$$

复相干值为:

$$\gamma_j = \sqrt{\nu_j} \exp(i \arg\{\omega_{1j}^*{}^T[\Omega_{12}] \omega_2\}) \quad (6)$$

2.2 相干散射模型

为了从干涉数据提取物理参数,必须要有一个将测量值和反演的参数结合起来的相干散射模型。对于 L 波段的雷达数据,这个模型必须考虑植被和地表的散射,这种情况可以用一个简单的二层模型来描述^[8-9,13,14]。上部植被层为一个具有未知厚度 h_V 且单位体积的散射幅度为 m_V 的随机方向粒子层,下部为一个高度为 z_0 的且具有散射幅度为 m_C 的地表层。假设用一个波长为 λ ,基线长度为 B ,均值入射角为 θ_0 ,斜距为 R 的干涉系统进行观测,在对复干涉相干进行距离向谱滤波后,相干性 $\hat{\gamma}$ 可写为:

$$\hat{\gamma}(\omega) = \exp(j\phi_0) \frac{\hat{\gamma}_V(\sigma, h_V) + m(\omega)}{1 + m(\omega)} \quad (7)$$

其中 ϕ_0 是与地表地形相关的相位, σ 为植被消光系数, $m(\omega)$ 是有效的地体幅度比率,只依赖于极化。

$$m(\omega) = \frac{m_C(\omega)}{m_V(\omega)} \exp\left(-\frac{2\sigma h_V}{\cos\theta}\right) \quad (8)$$

$\hat{\gamma}_V$ 是复干涉体相干可以写为

$$\hat{\gamma}_V = 2\sigma \left(\exp(2\sigma + jK_z \cos\theta) \frac{h_V}{\cos\theta} - 1 \right)$$

$$\left/ (2\sigma + jK_z \cos\theta) \left(\exp \frac{2\sigma h_V}{\cos\theta} - 1 \right) \right. \quad (9)$$

其中 $K_z = 4\pi B \cos(\theta - \delta) / \lambda R \sin\theta$ 。

3 基于模拟退火算法的极化干涉 SAR 地表植被参数反演模型

3.1 极化干涉地表植被参数反演模型

从上面的相干散射模型可以看出,为了求解 4 个独立的参数 ϕ_0, σ, h_V, m , 必须要 4 个独立的方程。对于极化干涉,从上节可知,由 3 个不同的极化可以得到 3 个不同的复相干值,即可以得到 6 个独立的方程,但地体幅度比值 $m(\omega)$ 随极化的不同而不同,即求解的独立参数变为 $\phi_0, \sigma, h_V, m_1, m_2, m_3$, 属于一个 6 维的非线性参数最优化问题。因此,反演模型的目标函数可以写为^[8-10]:

$$\sigma(\bar{X}) = \min \left(\left\| \begin{bmatrix} \hat{\gamma}_1 \\ \hat{\gamma}_2 \\ \hat{\gamma}_3 \end{bmatrix} - [M] \begin{bmatrix} \phi_0 \\ h_V \\ \sigma \\ m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} \right\| \right) \quad (10)$$

其中 $\hat{\gamma}_i$ 代表第 i 个最优相干的复相干值, $\bar{X} = [\phi_0, h_V, \sigma, m_1, m_2, m_3]$, $[M]$ 代表相干散射模型,见式(7)~(9)。对该反演模型,由于存在植被高度和消光系数模糊性以及相位模糊性即存在多解性^[15],因此用一般的局部最优化方法,受初始解的影响较大,往往得到的是局部最优解^[16-18],而模拟退火算法是一种全局最优化方法,可以改善和提高反演的地表植被参数的精度。

3.2 模拟加温-退火算法

模拟退火算法(Simulated Annealing Algorithm, 简记为 SAA)^[18-24]是近年来提出的解超大规模组合优化问题特别是 NP 完全问题的一种近似有效算法。其基本思想是模拟固体退火的物理过程,它将求解的问题的每个解(如式(9)中的 $\bar{X} = [\phi_0, h_V, \sigma, m_1, m_2, m_3]$)看成固体的一种状态,而将其代价函数 $f(i)$ (如式(9)中的 $\sigma(\bar{X})$)看成固体在该状态时的内能,由一个类似于固体状态跃迁摄动机制的产生器从当前解 i 随机产生新解 j ,再引入一个相当于温度的控制参数 t ,开始让 t 取较大的值,并由转移概率

$$P(i \Rightarrow j) = \begin{cases} 1 & \text{当 } f(j) < f(i) \\ \exp(-(f(j) - f(i))/t) & \text{否则} \end{cases} \quad (11)$$

决定是否接收从当前解 i 到新解 j 的转移。通过转移概率,在温度 t 值较大时,按照(11)式除了接受优化解以外,还可以有限度的接受恶化解,这使得算法有机会从局部最优的“陷阱”中跳出,尽可能地找到整体最优解。这正是 SAA 与别的一些近似算法如局部搜索法的区别。而随着 t 值的减小,最后,(11)式接受恶化解的转移概率几乎为零,只有最优解被接受。这刚好保证了算法的收敛。在进行足够多的上述过程后减小 t 值,如此反复,直至满足停止准则为止。SAA 算法的性能即解的质量和所需时间主要受以下两个因素直接决定。第一、退火的初始温度 t 。如果它的值太大将导致很长的运行时间,另一方面如果它的值过小,SAA 很难接受恶化解,几乎成为一种随机的局部搜索算法,因此合理的选取 t 值是一个难点。为了较好地解决此问题,在进行退火过程以前,加入一个加温过程即对固体进行加热,直到一个相变被探测到为止并将加温过程得到的温度 t 作为退火过程的初始温度,这样较好地解决了退火算法中初始温度的选取问题。这种新形式的 SAA 称为模拟加温-退火算法 (Heating-Annealing Algorithm, 简记为 HAA)^[23,24]。第二、加温-冷却进度表的选择^[24]。对于模拟加温-退火算法,它的加温-冷却进度表包括加温过程中的增量函数 h ,退火过程中的衰减函数 α ,每个马尔科夫链的长度 L_m 和停止准则 S 。它们的最优化选择除了一些基本的原则外^[23,24],主要取决于具体要反演的问题。经过正演模拟实验,在本文该组参数选为 $h = 0.5$, $\alpha = 0.8$, $L_m = 200$, S 取为在相继 10 次马尔科夫链中解得不到改善即终止。

4 反演算法结果及验证

本文所选的实验区位于新疆南部塔里木盆地西半部和昆仑山北坡的和田地区墨玉县绿洲,该区 90% 的地表具有密集的植被覆盖,防护林种多为新疆杨、箭杨和少量的胡杨,属阔叶林;耕地中的农作物在 10 月初大部分为冬小麦和少量的棉花,另外还有成片的果树林和桑树林;居民点附近果木和葡萄等经济作物较多。

实验数据为 1994 年 10 月 9 日和 10 日的航天飞机 SIR-C/X-SAR(数据条带为 154.20 和 170.20)L 波段散射矩阵单视复数据。为了反演地表植被参数,在绿洲地区选取了具有代表性的实验子区(图 1),图 1 中的白色区域示意该区具有成片的防护林。同

时,收集了图 1 中所示区域的准实时防护林高度实测数据。

地表植被参数反演计算主要包括以下基本步骤:

(1) 实验区数据的选取和图像配准。

(2) 最优干涉图生成和最优相干估计。利用式(2)~(6)计算得到代表 3 个散射机制的干涉图和相干系数(图 2)。可以看到,在地表植被丰富的地区,同一个点得到的 3 个相干系数值 $\gamma_1 \approx \gamma_2 \approx \gamma_3$ 。

(3) 同时,对得到的 3 个最优干涉图进行距离谱滤波,以消除干涉相位对地距坐标的依赖(图 3(a))。

(4) 基于地表植被参数的相干散射模型和反演模型,利用式(7)~(10)并结合(2)(3)步骤计算得到的结果,用模拟加温-退火算法反演式(10)中的地表植被参数。图 3(b)是计算的地表植被高度结果图。图 4 是图 3(b)中矩形区域的三维透视图。

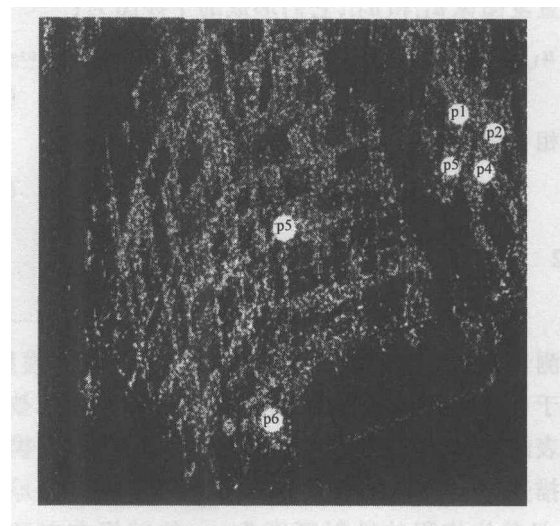


图 1 实验区 L-HV 幅度图

Fig.1 L-HV amplitude of test site

为了验证计算的结果,利用收集的 1995 年 1 月和田地区墨玉县林相调查实测数据,对图 1 中所示白色区域反演的防护林平均高度进行了比较和分析,其结果见表 1。从表 1 中结果可见,该反演算法较好地获取了地表防护林的高度,但是和实测的防护林的平均高度数据相比还有较大的误差,其误差源可以归结为以下 3 个大的方面:(1)干涉雷达基线估计的误差和各种去相干源的存在^[25-28]。(2)相干模型植被高度和消光系数模糊性以及相位模糊性的存在。(3)现阶段还缺乏多解质的评估标准对模拟加温-冷却进度表进行最优选取。以上 3 个误差源将降低地表植被高度反演的精度。

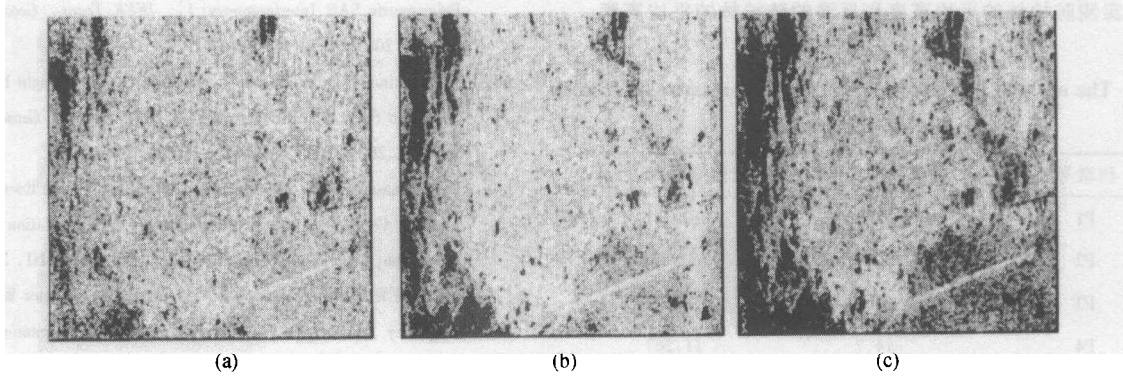


图 2 用最优相干算法得到的最优相干图

(a)由第一特征值得到相干图;(b)由第二特征值得到相干图;(c)由第三特征值得到相干图

Fig.2 Optimal Coherence Coefficient obtained from Optimal Coherent Algorithm

(a)coherence coefficient obtained from the first eigenvalue; (b)coherence coefficient obtained from the second eigenvalue; (c)coherence coefficient obtained from the third eigenvalue

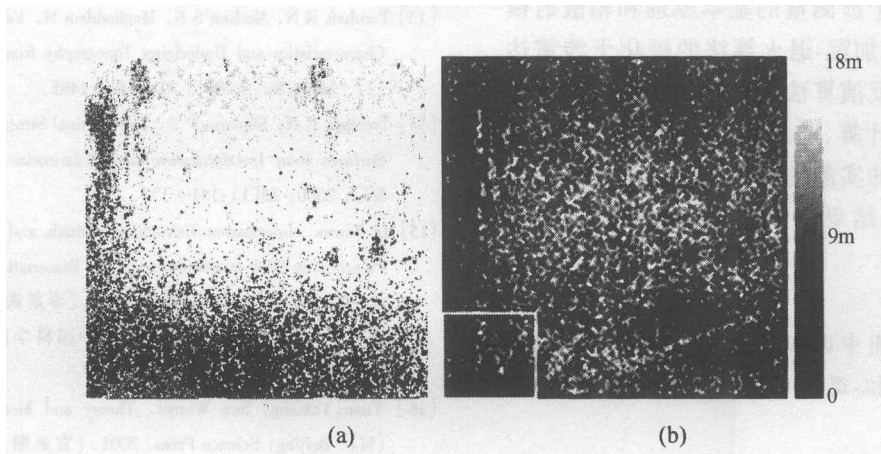


图 3 (a)距离谱滤波后对应于第 3 个相干系数的干涉图及(b)地表植被高度图

Fig.3 (a)The interferogram corresponding to the third coherence coefficient after range spectral filtering (b)The height of surface vegetation

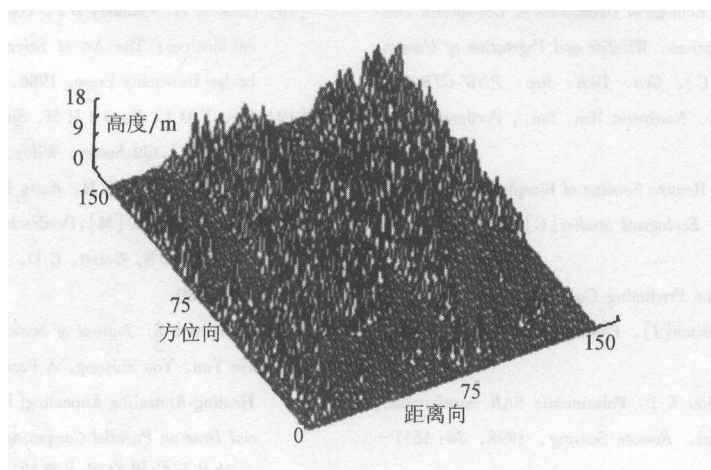


图 4 图 3(b)矩形区域的三维透视图

Fig.4 3D perspective view of the Fig.3(b) rectangle region

表 1 实测防护林的平均高度和反演的防护林的平均高度的比较

Table 1 The average height comparison of field measurement and inversion of shield forest

树墩号	实测平均高度/m	反演平均高度/m
P1	12.3	10.147
P2	12.1	9.236
P3	12.3	9.082
P4	14.7	11.267
P5	15.3	12.278
P6	16.2	12.968

5 结论和讨论

本文基于极化干涉测量的基本原理和相散射模型,提出了基于模拟加温-退火算法的极化干涉雷达数据地表植被参数反演算法。利用该算法进行了地表植被参数的反演计算,将反演的防护林平均高度的结果与该实验区的实测的防护林平均高度实测数据进行比较和分析,结果表明反演算法较准确估计了地表植被的高度。

致谢 作者感谢中国石油大学(北京)地球物理系黄临平教授对模拟-退火算法提出的有价值的讨论和贡献。

参 考 文 献 (References)

- [1] Waring R H, J Way, R Hunt Jr *et al.* Imaging Radar for Ecosystem Studies [J]. *Bioscience*, 1995, **45**:715—723.
- [2] Franklin J F, T A Spies. Ecological Definitions of Old-growth Douglas-fir Forests[A]. L Ruggiero. *Wildlife and Vegetation of Unmanaged Douglas-Fir Forests*[C]. *Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-285*, U. S. Dep. of Agric. Pac. Northwest Res. Stn., Portland, Oreg, 1991.
- [3] Mooney H A, R J Hobbs. Remote Sensing of Biosphere Function[A]. Hobbs R J, Mooney H A. *Ecological Studies*[C]. Springer-Verlag, New York, 1990.
- [4] Neilsop R P. A Model for Predicting Continental-scale Vegetation Distribution and Water Balance[J]. *Ecol. Appl.*, 1995, **5**:362—385.
- [5] Cloude S R, Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1998, **36**:1551—1565.
- [6] Robert N Treuhaft, Shane R Cloude. The Structure of Oriented Vegetation from Polarimetric Interferometry[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1999, **37**(5):2620—2624.
- [7] Sagues Liuis, Juan M Lopez-Sanchez *et al.* Indoor Experiments on

- Polarimetric SAR Interferometry[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2000, **38**(2):671—684.
- [8] Konstantinos P Papathanassiou, Shane R Cloude. Single-Baseline Polarimetric SAR Interferometry [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2001, **39**(11):2352—2363.
- [9] Papathanassiou K P, Cloude S R, A Reigber, W M Boerner. Multi-baseline Polarimetric SAR Interferometry for Vegetation Parameters Extraction[A]. *Proc. IGARSS'00*[C]. Honolulu, HI, 2000.
- [10] Cloude S R, Papathanassiou, K P, Reigber A, Borener W M. Multi-frequency Polarimetric SAR Interferometry for Vegetation Structure Extration[A]. *Proc. IGARSS'00*[C]. Honolulu HI, 2000.
- [11] Papathanassiou K P, Moreira J R. Interferometric Analysis of Multi-frequency and Multipolarization SAR Data[A]. *Proceedings IGARSS'1996*[C]. 1996.
- [12] Cloude S R. A Review of Target Decomposition Theorem in Radar Polarimetry[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1996, **34**(2):498—518.
- [13] Treuhaft R N, Madsen S N, Moghaddam M, Van Zyl J J. Vegetation Characteristics and Underlying Topography from Interferometric data [J]. *Radio Sci.*, 1996, **31**:1449—1495.
- [14] Treuhaft R N, Siqueira P R. The Vertical Structure of Vegetated Land Surfaces from Interferometric and Polarimetric Radar [J]. *Radio Sci.*, 2000, **35**(1):141—177.
- [15] Li Xinwu. Information Extraction Methods and Application study of Polarimetric SAR Interferometry[D]. Dissertation of Institute of Remote Sensing Application, CAS. 2002. [李新武. 极化干涉 SAR 信息提取方法及其应用研究[D]. 中国科学院遥感应用研究所博士学位论文,2002.]
- [16] Yuan Yaxiang, Sun Wenyu. Theory and Methods of Optimization [M]. Beijing: Science Press, 2001. [袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2001.]
- [17] Chen Baolin. Theory and Algorithm of Optimization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989. [陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京:清华大学出版社,1989.]
- [18] Press W H, Flannery B P, Teukolsky S A, Vetterling W T. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing, London[M], Cambridge University Press, 1986.
- [19] Aarts F H L, Korst J H M. Simulated Annealing and Boltzmann Machines[M], Chichester, Wiley, 1989.
- [20] Van Laarhoven P J M, Aarts E H L. Simulated Annealing: Theory and Application [M], Dordrecht, Reidel, 1987.
- [21] Kirkpatrick, S, Gelatt, C D, Vecchi, M P *Science*[J], 1983, **220**:671—680.
- [22] Kirkpatrick S. *Journal of Statistical Physics*[J], 1984, **34**:975—986.
- [23] Xie Yun, You Shiyong. A Parallel Simulated Annealing Algorithm—Heating-Annealing Annealing[J]. *Journal of Wuhan University (Special Issue on Parallel Computing)*, 1991, 49—58. [谢云, 尤先勇. 一种并行的模拟退火算法——加温退火法[J]. 武汉大学学报——并行计算专刊, 1991,49—58.]
- [24] Xie Yun, You Shiyong. The Parameter Selection of Cooling Schedules of Simulated Annealing Algorithm[J]. *Journal of Wuhan University (Special Issue on Parallel Computing)*, 1991, 71—82. [谢云, 尤

- 矢勇。模拟退火算法冷却进度表的参数选取[J]。武汉大学学报——并行计算专刊,1991, 71—82]。
- [25] David Small, Charles Werner, Daniel Nuesch. Baseline Modeling for ERS-1 SAR Interferometry [A]. *Proceedings IGARSS' 1993* [C]. 1993.
- [26] Hiroshi Kimura Masahiro Todo. Baseline Estimation Using Ground Points for Interferometric SAR [A]. *IGARSS1997* [C]. 1997, 442—444.
- [27] Zebker H A, Werner C I *et al.* Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1994, 32(4): 823—836.
- [28] Zebker H A, Villasenor J. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1992, 30(5): 950—959.

Inversion of Vegetation Parameters Using Spaceborne Polarimetric SAR Interferometry

LI Xin-wu, GUO Hua-dong, LIAO Jing-juan, WANG Chang-lin, YAN Fu-li

(LARSIS, Institute of Remote Sensing Application, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on the basic principal of polarimetric SAR interferometry (Pol-InSAR) and coherent scattering model, the inversion algorithm of vegetation parameters based on Simulated Annealing Algorithm is presented. First, the basic principal of Pol-InSAR and the two-layer coherent scattering model taken into account the scattering of surface and vegetation are discussed. Then, the basic theory of Simulated Annealing Algorithm and the inversion model based on Simulated Melt-Annealing Algorithm are discussed. At last, utilizing the complex single Sinclair matrix data of spaceborne SIR-C L-band, on October 9 and 10, 1994, the inversion of vegetation parameters is implemented. Comparison of the result of inversion with field measurement data indicates that the inversion algorithm can obtain the height of vegetation with good accuracy.

Key words: polarimetric SAR interferometry; coherent scattering model; simulated melt-annealing algorithm; parameter inversion