

三层植被极化干涉建模及参数反演新方法研究

李廷伟, 黄海风, 梁甸农, 朱炬波
(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 两层植被结构模型是传统三阶段植被参数反演方法的基础, 当实际植被结构为三层结构时, 三阶段植被参数反演方法精度变差. 针对该问题, 建立了与三层植被结构模型对应的极化 SAR 干涉复相关系数模型, 分析了传统三阶段植被参数反演方法精度变差的原因, 提出了基于双基线极化 SAR 干涉的三层植被参数反演新方法, 新方法充分考虑了三层植被干涉复相关系数的特征, 比传统的三阶段植被参数反演方法更适合于三层植被结构, 反演性能更好. 实验结果验证了所建的复相关系数模型的正确性和反演新方法的优越性.

关键词: 极化 SAR 干涉; 植被参数反演; 散射机理; 三阶段反演方法
中图分类号: TN958 **文献标识码:** A

The polarimetric InSAR model and a novel method for parameter inversion of the three-layer vegetation

LI Ting-Wei, HUANG Hai-Feng, LIANG Dian-Nong, ZHU Ju-Bo
(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: When the real vegetation is composed of three layers, the accuracy of the traditional three-stage vegetation parameter inversion method becomes lower. To solve this problem, a new polarimetric SAR interferometric coherence model was established. Based on this new model, the reason why the accuracy of the traditional three-stage vegetation parameter inversion method becomes lower was analyzed and a new vegetation parameter inversion method based on dual-baseline polarimetric SAR interferometry was proposed. Compared to the traditional inversion method, this new method is more suitable to the three-layer vegetation constructions and has higher accuracy. Experimental results validated the correctness and the superiority of the new method.

Key words: polarimetric SAR interferometry; vegetation parameter inversion; scattering mechanism; three-stage inversion method

PACS: 74.25.Nf

引言

极化干涉 SAR (Pol-InSAR) 已经成功用于植被参数反演^[1-2], 在所有的 Pol-InSAR 植被参数反演方法中, 三阶段方法及其改进方法是使用最多的植被参数反演方法^[3]. 三阶段方法的基础是两层 RVOG 模型及其 Pol-InSAR 复相关系数模型^[4]. 当植被底部的地面比较光滑, 而且二次散射机理比较强时, 应该考虑三层植被结构^[5], 必须建立相应的三层植被 Pol-InSAR 复相关系数模型. 建模结果表明: 由于三层植被极化干涉复相关系数模型估计所得的体相关

系数中含有 3 个未知参数, 而单基线极化干涉的体相关系数估计值中只有 2 个有效实观测量, 因此, 对于单基线极化 SAR 干涉, 这是一个不定问题, 必须寻找新的参数反演方法. 通过对三层植被 Pol-InSAR 复相关系数模型的分析可知, 可以通过增加基线数目的方式来增加有效观测量数目, 从而保证三层植被参数可反演. 基于双基线体相关系数估计值, 将三层植被参数估计问题转化为一个多维非线性参数估计问题, 然后利用非线性最小均方误差方法求解该问题, 获取植被参数.

收稿日期: 2010-01-11, 修回日期: 2010-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(61002031, 60902092)

作者简介: 李廷伟 (1978-), 男, 贵州德江人, 博士研究生, 研究方向为极化干涉 SAR 理论以及应用, E-mail: litingwei197882@yahoo.com.cn.

Received date: 2010-01-11, revised date: 2010-10-08

1 三层植被极化 SAR 干涉复相关模型

1.1 三层植被结构及主要散射机理

三层植被结构及其主要散射机理见图 1, 主要考虑植被体散射 v 、地面与树干之间的二次散射 d 和直接地面散射 s 三种散射机理, 同时假定三种散射机理的极化散射矩阵分别为 $F_{1v}, F_{1d}, F_{1s}, i = 1, 2, i$ 表示雷达编号. 对于图2所示的SAR结构, 假定发射天线和接收天线的极化分别为 \hat{P}_t 和 \hat{P}_r , 则对应于该收发极化的回波散射复幅度分别为

$$f_1(\vec{r}') = \hat{P}_{Tr}(\mathbf{F}_{1s} + \mathbf{F}_{1v} + \mathbf{F}_{1d})\hat{P}_t = f_{1s}(\vec{r}') + f_{1v}(\vec{r}') + f_{1d}(\vec{r}') \quad (1)$$

$$f_2(\vec{r}') = \hat{P}_{Tr}(\mathbf{F}_{2s} + \mathbf{F}_{2v} + \mathbf{F}_{2d})\hat{P}_t = f_{2s}(\vec{r}') + f_{2v}(\vec{r}') + f_{2d}(\vec{r}') \quad (2)$$

$f_{ij}(\vec{r}')$, $i = 1, 2, j = s, d, v$ 表示散射机理 j 在设定收发极化组合下的散射复幅度, 假定不同散射机理的极化散射复幅度之间相互独立, 而且满足空间独立性, 即有

$$\langle f_1(\vec{r})f_1^*(\vec{r}') \rangle = [\sigma_{1s}(\vec{r}) + \sigma_{1v}(\vec{r}) + \sigma_{1d}(\vec{r})] \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r}') \quad (3)$$

$$\langle f_2(\vec{r})f_2^*(\vec{r}') \rangle = [\sigma_{2s}(\vec{r}) + \sigma_{2v}(\vec{r}) + \sigma_{2d}(\vec{r})] \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r}') \quad (4)$$

其中, $\langle \cdot \rangle$ 表示求期望操作, $\sigma_{ij}(\vec{r}), i = 1, 2; j = s, v, d$ 表示两部雷达照射下三种散射机理的极化后向散射系数, 由于两部雷达视角差异不大, 因此两部雷达的极化后向散射系数之间差异可以忽略, 从而有

$$\sigma_{1j}(\vec{r}) = \sigma_{2j}(\vec{r}) \equiv \sigma_j(\vec{r}), j = s, v, d \quad (5)$$

$$\langle f_i(\vec{r})f_i^*(\vec{r}') \rangle = [\sigma_s(\vec{r}) + \sigma_v(\vec{r}) + \sigma_d(\vec{r})] \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r}'), i = 1, 2 \quad (6)$$

两部雷达散射复幅度之间的互相关为

$$\langle f_2(\vec{r})f_1^*(\vec{r}') \rangle = [\sigma_{se}(\vec{r}) + \sigma_{ve}(\vec{r}) + \sigma_{de}(\vec{r})] \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r}') \quad (7)$$

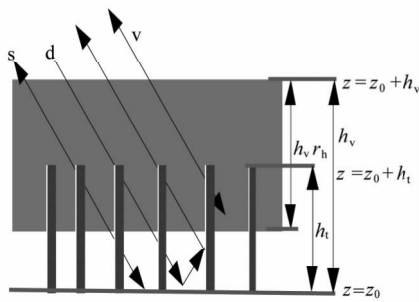


图1 三层植被结构及其主要散射机理图
Fig. 1 Three-layer vegetation and its main scattering contributions

其中 $\sigma_{se}(\vec{r}), \sigma_{ve}(\vec{r}), \sigma_{de}(\vec{r})$ 分别表示三种散射机理的有效极化后向散射系数.

假定极化后向散射系数和有效极化后向散射系数只与高程有关, 即有

$$\sigma_j(\vec{r}) = \sigma_j^0 \rho_j(z), \sigma_{je}(\vec{r}) = \sigma_{je}^0 \rho_j(z), \quad (8)$$

$$j = s, v, d$$

其中, $\sigma_j^0, j = s, v, d$ 和 $\sigma_{je}^0, j = s, v, d$ 分别表示三种散射机理的平均极化后向散射系数和平均极化有效后向散射系数; 而 $\rho_s(z), \rho_v(z), \rho_d(z)$ 分别表示三种散射机理的归一化极化有效散射系数, 表达式分别为

$$\rho_s(z) = \begin{cases} 1, z = z_0 \\ 0, z = \text{else} \end{cases}, \rho_d(z) = \begin{cases} 1, z = z_0 \\ 0, z = \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

$$\rho_v(z) = \frac{\exp(-2\beta \frac{(h_v - (z - z_0))}{\cos(\theta_0)})}{\int_{z_0+h_v-r_h h_v}^{z_0+h_v} \exp(-2\beta \frac{(h_v - (z' - z_0))}{\cos(\theta_0)}) dz'} \quad (10)$$

$$z \in [z_0 + h_v - r_h h_v, z_0 + h_v],$$

其中, z_0 表示植被底部地面的高度, h_v 表示植被总高度, r_h 表示树冠填充率, 即树冠占整个植被高度的比例, θ_0 表示入射角, β 表示随机体的消光系数.

1.2 三层植被复相关系数建模

记主、辅雷达经过配准处理之后的极化复图像表达式分别为

$$s_1(x, R_1) = A \iiint f_1(\vec{r}) \exp(-2ik_0 R_1) h(x - x', R_1 - R'_1) dV' + n_1 \quad (11)$$

$$s_2(x, R_2) = A \iiint f_2(\vec{r}') \exp(-2ik_0 R_2) h(x - x', R_2 - R'_2) dV' + n_2 \quad (12)$$

表示雷达系统的脉冲响应函数, 文中假定两部雷达具有相同的脉冲响应函数, 记

$$I_{rx}^0 = \iint |h(x - x', R - R')|^2 e^{i\beta r(R - R_0)} dR' dx' \quad (13)$$

$$I_{rx}^0 = \iint |h(x - x', R - R')|^2 dR' dx' \quad (14)$$

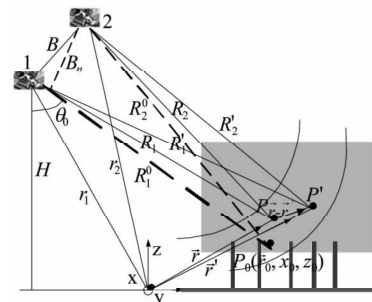


图2 极化 SAR 干涉几何
Fig. 2 Pol-InSAR geometry

$\text{cor}_s, \text{cor}_v, \text{cor}_d$ 分别表示三种散射机理的极化散射复幅度之间的互相关,表达式为

$$\text{cor}_j = A^2 e^{j\phi_0} \sigma_j^0 I_{rx}^0 \int \rho_j(z) e^{jk_z(z-z_0)} dz, j = s, v, d \quad (15)$$

类似地,该极化组合下的主、辅图像强度可分解为各个散射机理的极化强度之和,表达式为:

$$\langle |s_1|^2 \rangle = \langle |s_2|^2 \rangle = \text{In}_s + \text{In}_v + \text{In}_d + \sigma_n \quad (16)$$

其中, σ_n 表示热噪声功率, In_s, In_v 和 In_d 分别表示三种散射机理的极化 SAR 图像散射强度,表达式为

$$\text{In}_j = A^2 \sigma_j^0 I_{rx}^0 \int \rho_j(z) dz, j = s, v, d \quad (17)$$

从而极化干涉复相关系数为

$$\gamma = \frac{\langle s_1 s_2^* \rangle}{\sqrt{\langle |s_1|^2 \rangle \cdot \langle |s_2|^2 \rangle}} = \frac{\text{cor}_s + \text{cor}_v + \text{cor}_d}{\text{In}_s + \text{In}_v + \text{In}_d} \cdot \frac{\text{In}_s + \text{In}_v + \text{In}_d}{\text{In}_s + \text{In}_v + \text{In}_d + \sigma_n} \quad (18)$$

定义噪声去相关和斜距去相关分别为

$$\gamma_{\text{ther}} = \frac{\text{In}_s + \text{In}_v + \text{In}_d}{\text{In}_s + \text{In}_v + \text{In}_d + \sigma_n}$$

$$\gamma_r = \frac{\iint |h(x-x', R-R')|^2 e^{jK_K(R'-R_0)} dR'dx'}{\iint |h(x-x', R-R')|^2 dR'dx'} \quad (19)$$

三种散射机理的时间去相关为

$$\gamma_{ts} = \frac{\sigma_{se}^0}{\sigma_s^0}, \gamma_{tv} = \frac{\sigma_{ve}^0}{\sigma_v^0}, \gamma_{td} = \frac{\sigma_{de}^0}{\sigma_d^0} \quad (20)$$

由相关系数与归一化有效散射系数之间的关系,可得三种散射机理的相关系数

$$\gamma_{zs} = \gamma_{zd} = 1 \quad (21)$$

$$\gamma_{zv} = \exp(ik_z(1-r_h)h_v) \cdot \frac{2\beta \cdot \left\{ \exp\left(\frac{r_h h_v}{\cos(\theta_0)}(ik_z \cos(\theta_0) + 2\beta)\right) \right\}}{(2\beta + ik_z \cos(\theta_0)) \cdot \left(\exp\left(\frac{2\beta r_h h_v}{\cos(\theta_0)}\right) - 1 \right)}$$

$$= \frac{\exp(ik_z(1-r_h)h_v) \int_0^{r_h h_v} \exp\left(-\frac{2\beta}{\cos(\theta_0)}\right) \exp(ik_z z) dz}{\int_0^{r_h h_v} \exp\left(-\frac{2\beta}{\cos(\theta_0)}\right) dz} \quad (22)$$

该极化收发组合下各种散射机理占总的散射能量的比率可表示为

$$c_j = \sigma_j^0 I_{sj}^0 / (\sigma_s^0 I_{zs}^0 + \sigma_v^0 I_{zv}^0 + \sigma_d^0 I_{zd}^0), j = s, v, d \quad (23)$$

其中, I_{sj}^0 表示归一化平均有效散射系数的积分 $I_{sj}^0 = \int_{z_0}^{h_v+z_0} \rho_j(z) dz, j = s, v, d$, 则三层植被结构复相关系数模型为

$$\gamma = e^{j\phi_0} \gamma_r \gamma_{\text{ther}} \{ c_s \gamma_{zs} \gamma_{ts} + c_v \gamma_{zv} \gamma_{tv} + c_d \gamma_{zd} \gamma_{td} \} \quad (24)$$

把二次散射机理和直接地面散射机理的散射功

率统一记为地面散射功率 $c_g = c_s + c_d$, 另外假定不存在时间去相关. 同时, 还假定 $\gamma_r \gamma_{\text{ther}} = 1$, 再利用条件: $1 = c_s + c_v + c_d$, 则式(24) 可变为

$$\gamma = e^{j\phi_0} (\gamma_{zv} + m_{g/v}) / (1 + m_{g/v}) \quad (25)$$

$m_{g/v} = c_g/c_v$, 表示地面散射与体散射间的散射比率, ϕ_0 表示地面干涉相位, γ_{zv} 表示植被体复相关系数. 与式(25) 对应的极化复相关系数表达式为

$$\gamma(w) = e^{j\phi_0} (\gamma_{zv} + m_{g/v}(w)) / (1 + m_{g/v}(w)) \quad (26)$$

1.3 复相关系数特征分析

可以证明式(26) 表示的极化干涉复相关系数在复数平面上的分布是一条直线段, 如图 3 所示, 直线段的延长线与单位圆的一个交点的干涉相位对应于植被底层地面相位, 而植被体的复相关系数位于直线段的另一个端点上, 该直线分布特征是三阶段植被参数反演的基础.

式(26) 表达的三层极化干涉复相关系数与文献[3] 中的两层植被极化干涉复相关系数之间的最大区别在于植被体复相关系数表达式不同. 两层植被体复相关系数表达式为

$$\gamma_{zv} = \int_0^{h_v} \exp\left(\frac{2\beta}{\cos(\theta_0)}\right) \exp(ik_z z) dz / \int_0^{h_v} \exp\left(\frac{2\beta}{\cos(\theta_0)}\right) dz \quad (27)$$

由式(22) 可知, 三层植被结构体相关系数是 r_h, h_v 和 σ 三个未知参数的函数, 体相关系数的幅度和干涉相位都对植被高度和树冠填充率敏感, 其变化关系如图 4 和图 5 所示.

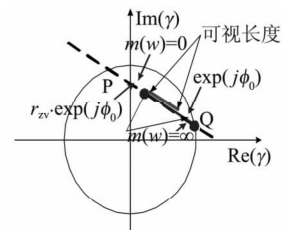


图 3 三层植被复相关系数分布图

Fig. 3 The distribution of complex coherences of the three-layer vegetation

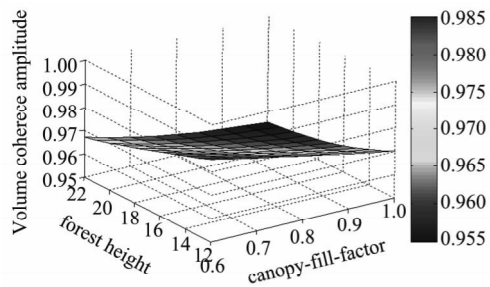


图 4 体相关系数绝对值随森林高度和树冠填充率变化关系图

Fig. 4 Volume coherence amplitude variation against forest height and canopy-fill-factor

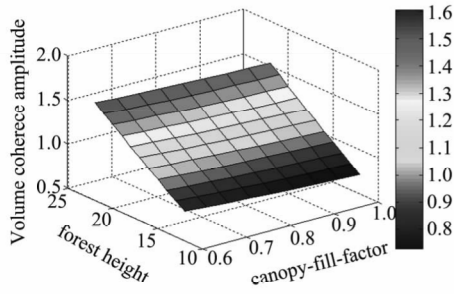


图5 体相系数相位随森林高度和树冠填充率变化关系图
Fig.5 Volume coherence phase variation against canopy-fill-factor and forest height

如果实际植被结构是三层结构,而仍然利用基于两层结构的方法进行植被参数反演,反演结果必然含有误差.图6和图7分别表示其反演的高度误差图和消光系数误差图,消光系数理论值为0.1db/m.由这两图可知,树冠填充率将在传统三阶段植被参数反演方法的反演结果中引入偏差,树冠填充率越小,反演偏差越大.

2 基于双基线极化干涉的植被参数反演新方法

2.1 反演新算法基本原理

由式(22)的分布特征可知,可以利用三阶段植被参数反演方法中的直线交线法确定植被体复相系数,只是在其估计值之后,不能利用式(27)进行植被参数反演,而应该基于式(22)进行植被参数反演.由三层植被极化干涉复相系数模型可知,三个未知参数独立于基线参数,因此,可以通过增加基线的方法增加观测量数目,两条基线的有效观测量数目将达到4个,超过三层植被体相系数中的未

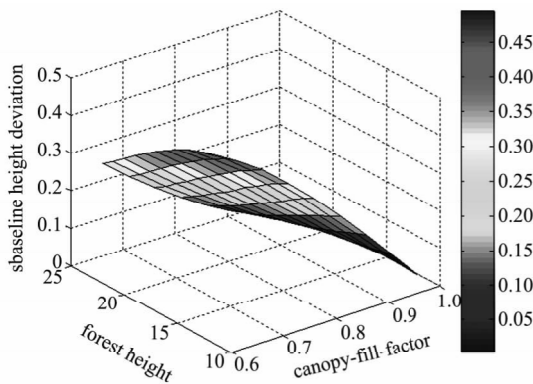


图6 单基线植被高度反演偏差随森林高度和树冠填充率变化示意图
Fig.6 Height inversion deviation against forest height and canopy-fill-factor by single baseline Pol-InSAR

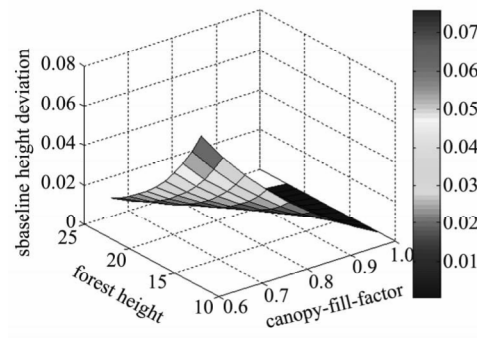


图7 消光系数反演偏差随森林高度和树冠填充率变化示意图
Fig.7 Extinction estimation deviation against forest height and canopy-fill-factor by single baseline Pol-InSAR

知参数个数3,从而可保证三层植被参数反演结果的唯一性,于是提出了基于双基线 Pol-InSAR 的三层植被参数方法.基于两条基线的体相系数观测值,该方法归结为如下的约束性非线性最小二乘问题

$$\begin{cases} \min \left(\left\| \begin{bmatrix} r_{zv1} \\ r_{zv2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} M_1(r_h, h_v, \sigma, k_{z1}) \\ M_2(r_h, h_v, \sigma, k_{z2}) \end{bmatrix} \right\|_2 \right) \\ \text{s. t. } 0 < h_v < 40, \sigma > 0 \\ 0 < r_h \leq 1 \end{cases}, \quad (28)$$

其中, $r_{zvi}, i = 1, 2$ 分别由两条基线估计所得的植被体相系数估计值,而 $M_i, i = 1, 2$ 是由式(22)确定的三层植被结构极化 SAR 干涉复相系数模型.

2.2 反演流程

双基线极化干涉三层植被参数反演流程图如图8所示,其输入是双基线 Pol-InSAR 数据,输出是植被参数估计值,中间处理过程主要包括下面六步:



图8 双基线极化干涉三层植被参数反演流程图
Fig.8 Low chart of parameters inversion of the three-layer vegetation by double-baseline Pol-InSAR

第一步:Pol-InSAR 数据配准和距离谱滤波处理;

第二步:极化干涉协方差矩阵高精度估计,进而得到多个极化复相关系数估计值;

第三步:利用文献[3]中的方法,根据挑选好的多个复相关系数估计值,利用最小二乘拟合方法确定每一条基线对应的分布直线;

第四步:利用文献[3]的方法,对每条基线,确定其地面干涉相位;

第五步:利用文献[6]中的方法,确定每一条基线对应的体相关系数;

第六步:联合两条基线的体相关系数估计值,利用式(28)求解植被参数.

3 仿真试验

为了验证模型的正确性和方法的有效性,利用 PolSARpro 软件^[8]仿真的植被极化干涉数据进行了验证. 仿真基本参数见表 1.

表 1 双基线 Pol InSAR 仿真参数表

Table 1 Simulation parameters of the double baselines PolInSAR

入射角	水平基线	垂直基线	中心频率	方位分辨率	斜距分辨率	树种	树高	平台高度
45°	12 m	5 m/9 m	1.3 G	1.5 m	1.606 m	3 pine	23 m	3000 m

植被空间几何如图 9 所示,而图 10 表示该森林场景对应的 VV 极化 SAR 幅度图像,图 11 表示 HV 极化干涉相位图(减去平地之后的).

对于图 11 的方块区域,分别利用所提的双基线极化干涉植被参数反演方法和传统的单基线极化干涉三阶段植被参数反演方法进行处理,其中单基线极化干涉分别利用 5 m 基线和 9 m 基线进行干涉处理,三种处理方法的植被高度估计直方图如图 12 所示,其中红色‘- -’所示的直方图为

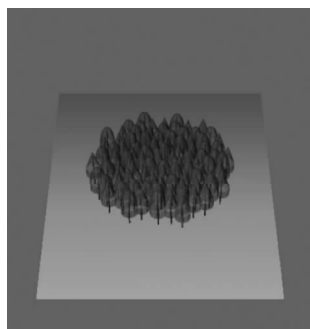


图 9 森林结构示意图
Fig. 9 Sketch map of the forest construction

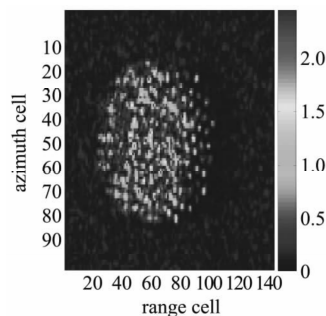


图 10 VV 极化 SAR 幅度图
Fig. 10 The amplitude image of the VV polarimetry

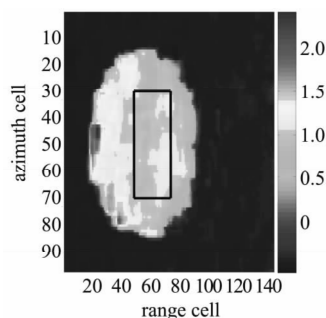


图 11 HV 极化干涉相位图
Fig. 11 The interferometric phase image of the HV polarimetry

双基线极化干涉处理结果,而黑色‘- -’表示 9 m 单基线植被高度反演结果,绿色的‘* -’线所示的直方图为 5m 单基线植被高度反演结果,蓝色垂直线表示树高理论值 23 m,由图 12 可知,双基线 Pol-InSAR 植被参数反演方法估计精度明显更好. 三种方法估计结果的均值和标准偏差见表 2,由表中的特征参数可知,基于双基线 Pol-InSAR 的植被参数反演方法的树高估计均值更接近理论值,而且具有更小的标准偏差. 图 13 表示双基线 Pol-InSAR 植被高度反演分布图,其高度估计均值在 23 m 附近,反演精度较高.

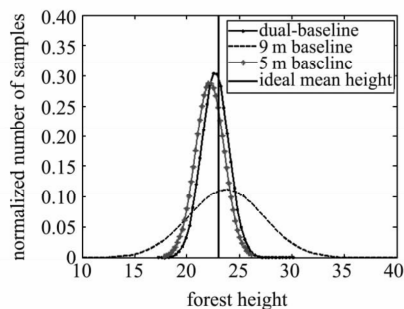


图 12 植被高度反演直方图对比图
Fig. 12 Inversed vegetation height PDF for different methods

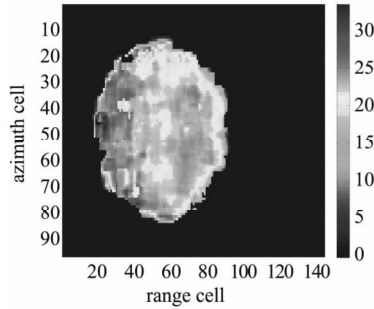


图 13 双基线 Pol-InSAR 植被高度分布图
Fig. 13 Inversed vegetation height distribution by double-baseline interferometry

表 2 不同参数反演方法均值和标准偏差统计表
Table 2 The mean and the standard deviation of the inversed vegetation height by different methods

方法	(9 m/5 m) 双基线极化干涉	9m 基线极化干涉	5 m 基线极化干涉
均值(m)	22.691	23.719	22.188
标准偏差(m)	1.3053	3.5845	1.3856

为了分析估计结果对初值的敏感性,分别取 6 ~ 30 m 范围内的植被高度作为迭代初值,进行植被参数反演,三种方法估计的植被高度均值和标准偏差随初始值的变化关系分别如图 14 和图 15 所示. 图中结果证明该优化方法对初值不敏感,基本都能得到全局最优解.

4 结论

在建立三层植被极化 SAR 干涉复相关系数模型的基础之上,分析了三阶段参数反演方法不适合

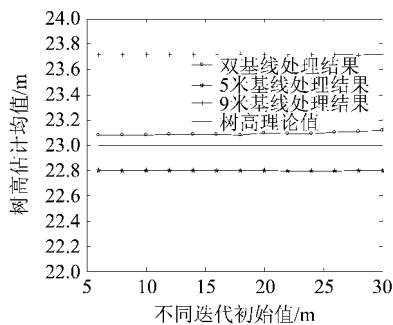


图 14 估计均值随树高初值变化图
Fig. 14 The mean of inversed vegetation height against different iterative starts for different methods

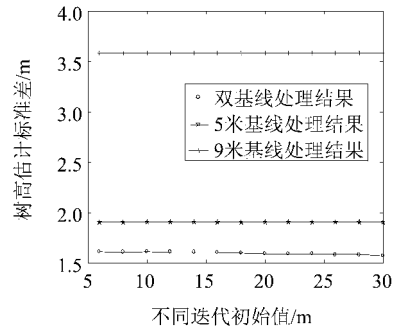


图 15 估计标准偏差随树高初值变化图
Fig. 15 The standard deviation of inversed vegetation height against different iterative starts for different methods

三层植被结构的原因,提出了基于双基线 Pol-InSAR 的植被参数反演方法,该方法适合于反演三层植被结构,反演精度高于传统的三阶段植被参数反演方法,而且三层植被模型是二层植被模型的扩展,因此,建立的模型和提出的反演方法具有广的适用范围,试验结果验证了模型的正确性和方法的有效性. 下一步工作是利用所提方法处理实测数据.

REFERENCES

- [1] Papathanassiou K P, Cloude S R. Single-baseline polarimetric SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, **39**(11): 2352 - 2362.
- [2] Garestier F, Dubois-Fernandez P C, Papathanassiou K P. Pine forest height inversion using single-pass X-band PolInSAR data [J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2008, **46**(1): 59 - 68.
- [3] Cloude S R, Papathanassiou K P. Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry [J]. *IEEE Proc. -radar sonar Navig*, 2003, **150**(3): 125 - 134.
- [4] Treuhaf R N, Siqueira P R. Vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar [J]. *Radio Science*, 2000, **35**(1): 141 - 177.
- [5] Neumann M, Ferro-Famil L, Pottier E. A general model-based polarimetric decomposition scheme for vegetated areas [C]. *Proceedings of the International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry*, Frascati, Italy, 2009.
- [6] Tan Lu-Lu, Yang Ru-Liang. Investigation on tree height retrieval with polarimetric SAR interferometry [C]. ICARSS, Boston, USA, 2008.
- [7] Lin Yi-Cheng. A fractal-based coherent scattering and propagation model for forest canopies [D]. Ph. D. dissertation. University of Michigan, 1997.
- [8] ESA, PolSARproSim [C/OL], <http://earth.esa.int/pol-sarpro/default.html>, 2007.