

合成孔径雷达简缩极化干涉数据的植被高度反演技术研究

谈璐璐^{①②} 杨立波^{①②} 杨汝良^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要: 该文提出了一种利用合成孔径雷达简缩极化干涉数据进行植被高度反演的三阶段方法。将全极化干涉数据处理中的相干最优方法引入简缩极化干涉数据处理,由相位最优相干系数对应的最优相位获得体去相干系数和地表相位的初始估计,利用相干区域边界提取方法更新体去相干系数,得到精确的植被高度估计值。采用欧空局提供的 L 波段的模拟全极化干涉数据构造简缩极化数据集,将该数据用于植被反演,反演结果验证了提出方法的有效性。

关键词: 简缩极化干涉 SAR; 植被高度反演; 三阶段; 简缩极化干涉相干最优; 相干区域边界提取

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)12-2814-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00091

Investigation on Vegetation Height Retrieval Technique with Compact PolInSAR Data

Tan Lu-lu^{①②} Yang Li-bo^{①②} Yang Ru-liang^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(The Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A three-stage vegetation height inversion method with compact polarimetric SAR interferometric data is proposed. The coherence optimization method applied to full PolInSAR data processing is introduced into compact PolInSAR processing. The optimum phase is used to get the initial estimation of volume decorrelation and ground phase. Volume decorrelation estimation is updated with coherence boundary extraction method. Simulated L-band full PolInSAR data provided by ESA is used to construct compact PolInSAR data, and the generated data is used for vegetation height inversion. Inversion results confirm the validity of the proposed method.

Key words: Compact polarimetric SAR interferometry; Vegetation height retrieval; Three-stage; Compact PolInSAR coherence optimization; Coherence region boundary extraction

1 引言

简缩极化技术 (Compact Polarimetry, CP) 是为简化全极化 SAR 系统设计提出的一种新概念^[1-3]。与全极化 SAR 系统交替发射两路相互正交的极化脉冲,并用两路相互正交的极化通道接收信号的工作方式不同,简缩极化 SAR 只发射具有特定极化状态的单一极化脉冲,用两路相互正交的极化通道接收信号。与全极化 SAR 系统相比,简缩极化 SAR 较全面保持了极化 SAR 信息,有效降低了对 SAR 系统复杂度及数据下传速率的要求。

简缩极化干涉 (Compact Polarimetric SAR Interferometry, C-PolInSAR) 是将简缩极化与干涉结合在一起的新技术,简缩极化干涉 SAR 的信息处理是近几年的研究热点^[4-6]。与全极化干涉 SAR (Full Polarimetric SAR Interferometry, F-

PolInSAR) 类似,简缩极化干涉能有效提取植被的垂直结构信息,研究植被覆盖条件下的地面参数反演是简缩极化干涉 SAR 信息提取的重要研究方向之一。

目前利用简缩极化干涉 SAR 数据进行植被高度反演的方法主要有:(1)重建伪全极化干涉 SAR 数据法:由简缩极化干涉 SAR 数据重建伪全极化干涉数据,利用重建的数据进行反演,但重建以对称性假设为前提,存在误差,导致该类反演算法偏差较大^[4],且全极化数据重建并没有增多数据包含的信息量,对反演结果没有改善;(2)遍历求解简缩极化干涉 SAR 数据相干区域方法^[7]:发射极化状态固定,遍历计算不同接收极化状态下的 C-PolInSAR 数据的干涉相干系数,利用这些相干系数在复平面内的分布,按照全极化干涉数据的三阶段估计方法^[7],反演植被高度,这种方法虽然能获取较高的反演精度,但需遍历计算所有接收状态下的复干涉相干系数,

计算量大。

本文针对遍历求解简缩极化干涉 SAR 数据相干区域方法计算量过大的缺点, 提出了一种结合相位相干最优和相干区域边界提取的三阶段植被高度反演方法, 不需要遍历计算所有接收状态下的干涉系数, 将全极化干涉 SAR 处理中的相干最优技术引入简缩极化干涉 SAR 数据, 由相位最优相干系数对应的最优相位获得体去相干系数和地表相位的初始估计, 利用相干区域边界提取方法更新体去相干系数, 得到精确的植被高度估计值。运用欧空局的软件 PolSARpro 提供的森林区域全极化干涉 SAR 数据构造简缩极化干涉 SAR 数据, 对构造的简缩极化干涉 SAR 数据进行反演, 并将反演结果与遍历求解简缩极化干涉 SAR 数据相干区域方法的反演结果进行比较。

2 简缩极化 SAR 与简缩极化干涉 SAR

2.1 简缩极化 SAR

如前所述, 简缩极化 SAR 发射具有特定极化状态的单一极化波, 用两路相互正交的极化方式接收信号。根据发射及接收电磁波的极化状态, 提出了若干不同的简缩极化模式, 常用的有 3 种^[3]: (1) $\pi/4$ 模式, 发射 45° 线极化波, 水平和垂直线极化接收; (2) 双圆周极化模式(Dual Circular Polarimetric, DCP)模式, 发射左旋或右旋圆极化波, 左旋和右旋圆极化波接收; (3) 圆周极化发射线性极化接收模式(Circular Transmit and Linear Receive, CTRLR), 发射左旋或右旋圆极化波, 线性水平和线性垂直极化接收。本文主要分析 $\pi/4$ 模式, 在此模式下测得的目标散射矢量为

$$\mathbf{k}_{\pi/4} = [S_{HH} + S_{HV} \quad S_{HV} + S_{VV}]^T / \sqrt{2} \quad (1)$$

式中 H 和 V 分别表示线性水平和线性垂直极化, 对应的 2×2 的目标协方差矩阵为

$$\mathbf{J}_{\pi/4} = \langle \mathbf{k}_{\pi/4} \mathbf{k}_{\pi/4}^H \rangle \quad (2)$$

式(2)中 $\langle \cdot \rangle$ 表示空间平均。由式(2)中的 2×2 的目标协方差矩阵中的 4 个变量及对称性假设, 可重建 3×3 的全极化协方差矩阵。

2.2 简缩极化干涉 SAR

简缩极化干涉 SAR 将简缩极化 SAR 技术推广至干涉 SAR 系统, 简缩极化干涉 SAR 从两个略微不同的视角测量场景中每个分辨单元的简缩极化散射矢量。 $\pi/4$ 模式的简缩极化干涉 SAR 测得的散射矢量为

$$\mathbf{k}_{\pi/4,m} = [S_{HH,m} + S_{HV,m} \quad S_{VV,m} + S_{HV,m}]^T / \sqrt{2}, \quad m = 1, 2 \quad (3)$$

式(3)中 $m = 1, 2$ 表示两个不同的观测视角。

简缩极化干涉系统测得的信息可由 4×4 的协方差矩阵 \mathbf{J}_4 表示

$$\mathbf{J}_4 = \left\langle \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{\pi/4,1} \\ \mathbf{k}_{\pi/4,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{\pi/4,1}^H & \mathbf{k}_{\pi/4,2}^H \end{bmatrix} \right\rangle = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{11} & \mathbf{J}_{12} \\ \mathbf{J}_{12}^H & \mathbf{J}_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 \mathbf{J}_{11} 和 \mathbf{J}_{22} 分别为主辅图像的简缩极化协方差矩阵, \mathbf{J}_{12} 是同时包含简缩极化信息及干涉信息的互协方差矩阵。与简缩极化 SAR 类似, 利用 \mathbf{J}_4 及对称性假设, 可重建 6×6 的全极化干涉 SAR 数据的协方差矩阵^[4]。

3 利用简缩极化干涉 SAR 数据的植被高度反演

3.1 RVoG 模型及全极化干涉数据的植被高度三阶段反演方法

极化干涉 SAR 的一个重要应用是将包含地面散射成分的随机散射体(Random Volume over Ground, RVoG)模型应用至森林树高反演中^[8]。在 RVoG 模型中, 从森林散射的信号被建模成地面分量和体散射分量的组合。由文献[9], 干涉相干的表达式为

$$\begin{aligned} \gamma(\boldsymbol{\omega}) &= e^{j\phi_e} \frac{\gamma_v + \mu(\boldsymbol{\omega})}{1 + \mu(\boldsymbol{\omega})} = e^{j\phi_e} \left(\gamma_v + \frac{\mu(\boldsymbol{\omega})}{1 + \mu(\boldsymbol{\omega})} (1 - \gamma_v) \right) \\ &= e^{j\phi_e} (\gamma_v + L(\boldsymbol{\omega})(1 - \gamma_v)), \quad 0 \leq L(\boldsymbol{\omega}) \leq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\boldsymbol{\omega}$ 是表示与极化有关的单位矢量, ϕ_e 为地表相位, $\mu(\boldsymbol{\omega})$ 表示有效的地面散射与体散射回波的幅度比, 它是式(5)中唯一与极化有关的变量, γ_v 是体散射去相干系数, 表达式为

$$\gamma_v = \frac{2\sigma}{\cos \theta_0 (e^{(2\sigma h_v)/\cos \theta_0} - 1)} \int_0^{h_v} e^{jk_z z'} e^{(2\sigma z')/\cos \theta_0} dz' \quad (6)$$

式中 σ 是媒质中的平均消光系数, k_z 是干涉仪的平均波数, θ_0 为平均入射角, h_v 是平均树高。由式(5)可得, 复相干系数为复平面内的一条直线, 该直线与复平面的单位圆有两个交点, 其中一个交点是地表相位点^[7]。

利用全极化干涉数据进行植被反演的诸多方法中, 三阶段反演算法是最常用的。该方法利用复相干系数线性分布及体散射去相干假设, 分三步求解垂直结构参数:

(1) 从极化干涉数据中估计出每个像素在 N 个极化状态中的复相干值, 并将这 N 个通道的相干值利用最小二乘方法拟合出相干直线。

(2) 计算相干直线与单位圆的两个交点, 从中判断出地表相位 ϕ_e 。一般情况下, 选择距离 HV 通道的干涉相干系数 γ_{HV} 比距 HH-VV 通道的干涉相干系数 γ_{HH-VV} 远的点, 或选择与 γ_{HV} 的辐角差比与

$\gamma_{\text{HH}+\text{VV}}$ 的辐角差大的点作为地表相位点^[10]。

(3) 假设体去相干系数的估计值为 $\hat{\gamma}_v$ ，根据式 (6)，以及森林高度 h_v 、消光系数 σ 变化的大体范围，选择不同的 h_v 和 σ 值，建立一个体散射去相关 γ_v 随着森林高度和消光系数变化的查找表，将估计值 $\hat{\gamma}_v$ 与查找表相比较，寻找查找表中与距离最小的 $\hat{\gamma}_v$ 值对应的植被高度即为最终的估计值。

3.2 简缩极化干涉数据的植被参数三阶段反演方法

3.2.1 遍历求解简缩极化干涉数据相干区域的反演方法

由全极化干涉 SAR 数据能获得任意发射和接收极化状态下的干涉相干系数，而对简缩极化干涉 SAR 数据，发射状态是固定的，我们只能得到在固定极化发射状态下任意接收极化状态的干涉系数。文献[6]中，Dubois-Fernandez 等人提出了一种通过遍历求解 C-PolInSAR 数据相干区域反演植被高度的方法，后面简称为 Dubois 方法。

由于任意接收通道的干涉系数如下：

$$\gamma(\psi, \eta) = \frac{\langle \mathbf{k}_1(\psi, \eta) \mathbf{k}_2^*(\psi, \eta) \rangle}{\sqrt{\langle \mathbf{k}_1(\psi, \eta) \mathbf{k}_1^*(\psi, \eta) \rangle} \sqrt{\langle \mathbf{k}_2(\psi, \eta) \mathbf{k}_2^*(\psi, \eta) \rangle}} \quad (7)$$

式中 $\mathbf{k}_m(\psi, \eta) = \begin{bmatrix} \cos \psi \\ e^{j\eta} \sin \psi \end{bmatrix}^T \mathbf{k}_m$ ， $\mathbf{k}_m, m = 1, 2$ 分别是主辅通道的简缩极化目标散射矢量， ψ 和 η 为极化相位描述子， $\psi \in [0, \pi]$ ， $\eta \in [0, \pi]$ ， $\mathbf{k}_m(\psi, \eta)$ 代表不同极化状态下的简缩极化散射矢量。遍历 ψ 和 η ，可得到简缩极化干涉 SAR 数据对应的相干区域，该区域是全极化干涉 SAR 数据相干区域的子集。利用这一相干区域，结合 3.1 节介绍的三阶段反演步骤，反演出植被高度。该方法需计算大量极化通道的相干系数，运算量大。

3.2.2 利用简缩极化干涉 SAR 相干最优和相干区域提取的植被高度反演方法

为克服遍历求解相干区域反演方法运算量大的缺点，本文提出了一种利用简缩极化干涉相干最优获得地表相位估计值，并提取相干区域边界获得体去相干估计，进而得到植被高度估计值的三阶段反演方法。

(1) 利用简缩极化相干最优的地表相位估计

极化干涉相干最优即在极化状态空间中寻找能使干涉相干系数达到最优的极化状态组合。极化干涉 SAR 的最优化算法可分为幅度最优化算法和相位最优化算法。前者是在极化空间中寻求相干幅度最大的极化状态组合，后者是寻求相位偏移最大的极化状态组合^[11]。

全极化干涉的幅度相干最优算法能直接引入至简缩极化干涉数据中^[12]，同样，本文将相位最优算法直接引入简缩极化干涉中。

简缩极化干涉 SAR 数据的干涉相干系数为

$$\gamma(\omega_1, \omega_2) = \frac{\omega_1^H \mathbf{J}_{12} \omega_2}{\sqrt{\omega_1^H \mathbf{J}_{11} \omega_1} \sqrt{\omega_2^H \mathbf{J}_{22} \omega_2}} \quad (8)$$

式中 ω_1 和 ω_2 是代表主辅图像极化状态的 2×1 的西投影矢量。对应于最大 $|\gamma(\omega_1, \omega_2)|$ 的最优投影矢量 $\omega_{1\text{opt}}$ 和 $\omega_{2\text{opt}}$ 可利用矩阵的特征分解计算^[13]：

$$\mathbf{J}_{11}^{-1} \Omega_{12} \mathbf{J}_{22}^{-1} \Omega_{12}^H \omega_{1\text{opt}} = \nu \omega_{1\text{opt}} \quad (9)$$

$$\mathbf{J}_{22}^{-1} \Omega_{12}^H \mathbf{J}_{11}^{-1} \Omega_{12} \omega_{2\text{opt}} = \nu \omega_{2\text{opt}} \quad (10)$$

由分解得到的两组特征矢量可得幅度最优相干系数 γ_{opt1} ， γ_{opt2} 。

使复干涉图像对的干涉相位偏移最大的相位最优投影矢量可由下式所示的矩阵的特征分解获得^[14]：

$$-j(\hat{\mathbf{J}}_{12} + \hat{\mathbf{J}}_{12}^H)^{-1}(\hat{\mathbf{J}}_{12} - \hat{\mathbf{J}}_{12}^H)\omega_{\text{opt}} = \lambda \omega_{\text{opt}} \quad (11)$$

式中 $\hat{\mathbf{J}}_{12} = \mathbf{J}_{12} \exp(j\varphi)$ ， $\varphi = -\angle \text{trace}(\mathbf{J}_{12})$ ， trace 为矩阵的迹，分解得到的两个特征矢量对应相位最优相干系数 γ_{div1} ， γ_{div2} 。

由简缩极化干涉 SAR 数据集，可获得 N 个极化状态下的干涉相干系数，这里选择 $N = 7$ ，得到如下的干涉系数 (γ_{opt1} ， γ_{opt2} ， γ_{div1} ， γ_{div2} ， $\gamma_{\text{HH}+\text{HV}}$ ， $\gamma_{\text{HV}+\text{VV}}$ ， $\gamma_{\text{HH}+\text{VV}}$)。利用这 N 个通道的相干值拟合出相干直线，该直线与单位圆有两个交点 $e^{j\phi_1}$ 和 $e^{j\phi_2}$ ，其中一个交点是地表相位的估计值。一般认为，在 HV 通道中体散射占主导地位，HH+VV 通道中表面散射占主导地位，在全极化干涉数据反演中，选择与 γ_{HV} 的辐角差比与 $\gamma_{\text{HH}+\text{VV}}$ 的辐角差大的点作为地表相位点，然而由简缩极化干涉 SAR 数据无法得到 γ_{HV} 的估计。由极化干涉相位相干最优的物理意义，获得的两个相干系数位于处在相干区域的两端。则必有一个相干系数最接近地表相位，另一个最接近体散射去相干点，可以认为 γ_{div1} 或 γ_{div2} 可能是体散射占主导或表面散射占主导的极化通道。若 $e^{j\phi_m}, m = 1, 2$ 是地表相位，那么体散射通道的初始估计为

$$\hat{\gamma}_{v,m} = \begin{cases} \gamma_{\text{div1}} e^{-j\phi_m}, & |\gamma_{\text{div1}} - \exp(j\phi_m)| \\ & > |\gamma_{\text{div2}} - \exp(j\phi_m)| \\ \gamma_{\text{div2}} e^{-j\phi_m}, & |\gamma_{\text{div1}} - \exp(j\phi_m)| \\ & < |\gamma_{\text{div2}} - \exp(j\phi_m)| \end{cases} \quad (12)$$

这样，就得到两组地表相位和体去相干的估计值 ($\hat{\gamma}_{v1}, e^{j\phi_1}$) 和 ($\hat{\gamma}_{v2}, e^{j\phi_2}$)。

分别利用这两组估计值以及建立的 γ_v 关于 h_v 和 σ 的查找表，得到两组植被高度和消光系数的估计值 (h_{v1}, σ_1) 和 (h_{v2}, σ_2)。由于合理的植被参数估计值应符合 3.1 节提到的植被散射模型，选使式(13)

最小的一组解对应的地表相位为估计出的地表相位点 ϕ_e :

$$\begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{i\phi_e} \frac{\hat{\gamma}_{v,1} + \mu_1}{1 + \mu_1} \\ e^{i\phi_e} \frac{\hat{\gamma}_{v,2} + \mu_2}{1 + \mu_2} \\ e^{i\phi_e} \frac{\hat{\gamma}_{v,3} + \mu_3}{1 + \mu_3} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中 $\gamma_{v,m}$ 的值可由式(6)求出, $\gamma_m, m = 1, 2, 3$ 是不同极化通道的干涉系数, 这 3 个极化通道的地体幅比值 μ_m 为

$$\mu_m = \frac{\hat{\gamma}_{v,m} - \gamma_m}{\gamma_m - \exp(j\phi_m)} \quad (14)$$

(2) 利用相干区域边界提取的体去相干系数估计 在上节得到的植被高度的初始估计的基础上, 利用相干区域边界提取方法修正体散射去相干估计, 修正植被高度估计值, 以提高反演的精度。

根据体去相干的性质可得, 体去相干系数是在相干直线上的距离地表相位点最远的点, 并且这一点应该处在相干区域内, 因此, 寻找相干区域的边界点, 取距离地表相位点最远的边界点作为体去相干的估计^[15, 16]。

简化后的复干涉相干系数定义为

$$\gamma(\omega) = \frac{\omega^H \mathbf{J}_{12} \omega}{\omega^H \mathbf{J} \omega}, \quad \mathbf{J} = \frac{\mathbf{J}_{11} + \mathbf{J}_{22}}{2} \quad (15)$$

上节已求出地表相位 ϕ_e , 在相干区域内, 所有相干值都经过了 $\exp(j\phi_e)$ 的偏置, 因此相干区域内点的表达式为 $\gamma(\omega) \exp(j\phi_e)$, 而相干区域近似为一条直线, 则在相干直线上的边界点可能是 $\gamma(\omega) \exp(j\phi_e)$ 的实部或虚部的极值对应的相干系数, 其实部和虚部的表达式分别为^[16]

$$\text{Re}(\gamma(\omega) \exp(j\phi_e)) = \frac{\omega^H ((e^{j\phi_e} \mathbf{J}_{12} + e^{-j\phi_e} \mathbf{J}_{12}^H) / 2) \omega}{\omega^H \mathbf{J} \omega} \quad (16)$$

$$\text{Im}(\gamma(\omega) \exp(j\phi_e)) = \frac{\omega^H ((e^{j\phi_e} \mathbf{J}_{12} - e^{-j\phi_e} \mathbf{J}_{12}^H) / 2) \omega}{j \omega^H \mathbf{J} \omega} \quad (17)$$

使 $\text{Re}(\gamma(\omega) \exp(j\phi_e))$ 取极值的散射矢量 $\omega_m, m = 1, 2$ 可由如下矩阵的特征分解得到

$$\frac{1}{2} \mathbf{J}^{-1} (\mathbf{J}_{12} + \mathbf{J}_{12}^H) \omega = \lambda \omega \quad (18)$$

使 $\text{Im}(\gamma(\omega) \exp(j\phi_e))$ 取极值的散射矢量 $\omega_m, m = 3, 4$ 可由如下矩阵的特征分解得到

$$-\frac{j}{2} \mathbf{J}^{-1} (\mathbf{J}_{12} - \mathbf{J}_{12}^H) \omega = \lambda \omega \quad (19)$$

因此, 相应的相干直线的边界点分别为

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{\omega_1^H \mathbf{J}_{12} \omega_1}{\omega_1^H \mathbf{J} \omega_1}, \quad \gamma_2 = \frac{\omega_2^H \mathbf{J}_{12} \omega_2}{\omega_2^H \mathbf{J} \omega_2} \\ \gamma_3 &= \frac{\omega_3^H \mathbf{J}_{12} \omega_3}{\omega_3^H \mathbf{J} \omega_3}, \quad \gamma_4 = \frac{\omega_4^H \mathbf{J}_{12} \omega_4}{\omega_4^H \mathbf{J} \omega_4} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

利用已知的地表相位, 可以从 4 个边界点中选出距离地表相位最远的点作为体去相干的估计

$$\hat{\gamma}_v = \gamma_s \exp(-j\phi_e) \quad (21)$$

式(21)中, $|\gamma_s - \exp(j\phi_e)| = \max(|\gamma_m - \exp(j\phi_e)|)$, $m = 1, 2, 3, 4$, 即 γ_s 为选定的距离地表相位最远的相干系数点。

(1)和(2)中详细介绍了本文提出的结合相位相干最优和相干区域边界提取方法获得地表相位及体去相干系数估计的方法, 该方法充分利用简缩极化干涉 SAR 数据包含的信息以及相干区域的性质, 且不需要遍历计算任意接收极化通道下的相干系数, 在保持估计精度的同时有效降低了运算量。

(3) 植被高度估计 根据式(10), 体散射去相干 γ_v 仅与植被高度 h_v 及 σ 有关。得到体散射去相干的估计后, 选择不同的 h_v 和 σ 值, 建立 γ_v 关于 h_v 和 σ 的查找表。将体去相干系数估值 $\hat{\gamma}_v$ 与 γ_v 相比, 就可查表估计出植被高度 h_v 。

4 实验和分析

为验证本文提出的树高反演方法的有效性, 首先利用欧空局提供的软件 PolSARpro 的模拟器^[17] 模拟生成 L 波段的森林的全极化干涉数据。具体模拟参数为: 雷达平台高度 3000 m, 水平基线 10 m, 垂直基线 1 m, 入射角 45°, 中心频率 1.3 GHz, 树高是 10 m。图 1 所示的是模拟的全极化干涉数据的 HH, HV 和 VV 通道的功率图, 中间圆形区域对应着植被。

由模拟全极化干涉数据集的 HH 与 HV 通道数据求和, HV 及 VV 通道数据求和可得 HH+HV 以及 HV+VV 通道的数据, 这样就生成了 $\pi/4$ 模式的简缩极化干涉数据集。图 2 所示的是 $\pi/4$ 模式简缩极化干涉数据集中两个通道的幅度图像。图 2(a)是 HH+HV 通道, 图 2(b)是 HV+VV 通道。

图 3 所示的是分别用本文方法和 Dubois 方法反演植被高度的直方图显示, 图 4 所示的是图 2 标注直线的反演结果对比。

由图 3 和图 4 可直观地看出, 本文提出的方法和 Dubois 方法得到的植被高度反演结果基本一致。在相同的硬件平台(Pentium 4 CPU 2.8 GHz, 1 GB 内存)和软件环境(Windows XP, Matlab 7.0)下, Dubois 方法得到每个像素的高度估计值所需时间为 0.3150 s, 本文提出方法得到每个像素的高度估计值所需时间为 0.0659 s, 显然, 本文提出方法耗费时间远低于 Dubois 方法, 运算效率明显优于 Dubois 方法。

表 1 给出了本文方法和 Dubois 方法对简缩极化

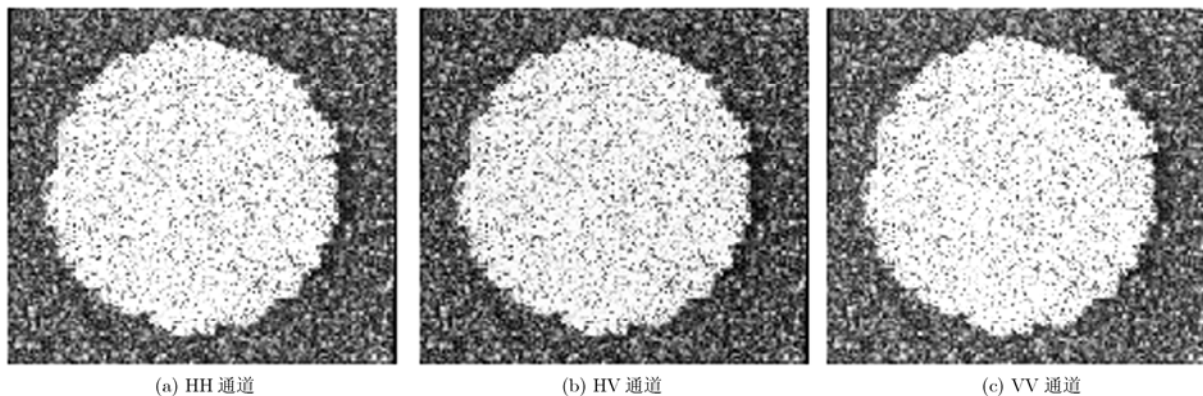


图 1 模拟数据各通道的功率显示

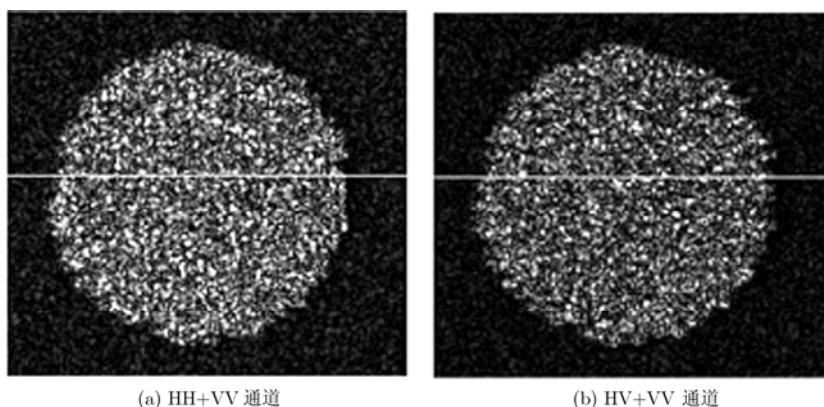


图 2 模拟数据的幅度显示

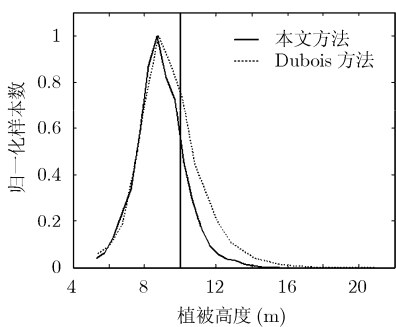


图 3 本文方法反演结果和 Dubois 方法反演结果直方图显示

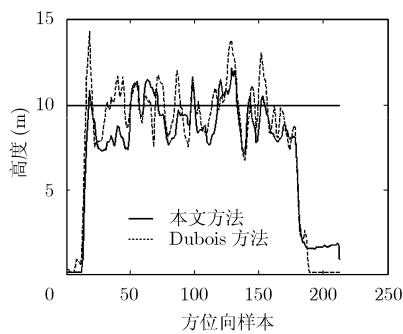


图 4 图 2 标注方位线的反演结果

干涉数据进行反演结果，以及运用三阶段反演方法^[15]对全极化干涉数据反演结果的定量比较。

表 1 反演结果定量比较

	平均误差(m)	RMSE(m)
本文方法	1.4407	1.7433
Dubois 方法	1.4139	1.7732
全极化干涉 SAR 数据反演结果	1.2345	1.6789

表 1 中，平均误差的定义为

$$\bar{e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |h_v(i) - h_{v0}| \quad (22)$$

均方根误差(RMSE)的定义为

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |h_v(i) - h_{v0}|^2}{N}} \quad (23)$$

式(22)-式(23)中， h_v 是反演出的树高， h_{v0} 是理论树高， N 是进行比较的样本点数。从表 1 可看出，本文提出方法和 Dubois 方法得到的植被高度反演结

果基本一致, 且得到的结果与全极化干涉 SAR 数据的反演结果相比, 没有太大偏差, 均接近理论值。

综上, 由实验结果可分析得出, 本文提出的反演算法是有效的。

5 结论

本文提出了一种利用简缩极化干涉 SAR 数据的植被高度反演方法, 将全极化干涉 SAR 的相干最优技术引入简缩极化干涉 SAR, 并结合最优相干相位和相干区域提取方法得到地表相位和植被高度的估计, 反演结果验证了该方法的有效性。

参考文献

- [1] Imbo P and Souyris J C. Assessment of partial polarimetry versus full polarimetry architectures for target analysis[C]. Proc. of EUSAR 2000, Munich, Germany, 2000: 1-4.
- [2] Souyris J C, *et al.* Compact polarimetry based on symmetry properties of geophysical media: the $\pi/4$ mode[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(3): 634-646.
- [3] Nord M E, *et al.* Comparison of compact polarimetric synthetic aperture radar modes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(1): 174-188.
- [4] Lavalley M, Pottier E, and Desnos Y L. Investigation on the performance of compact polarimetry in SAR interferometry [C]. Proc. of EUSAR 2008, Friedrichshafen, Germany, 2008: 1-4.
- [5] Dubois-Fernandez P C, *et al.* The compact polarimetry alternative for spaceborne SAR at low frequency [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3208-3222.
- [6] Angelliaume S, Dubois-Fernandez P, and Souyris J C. Compact PolInSAR for vegetation characterisation[C]. Proc. of IGARSS'07, Barcelona, Spain: IEEE, 2007: 1136-1138.
- [7] Dubois-Fernandez P, *et al.* The specificity of P band PolInSAR data over vegetation[C]. Proc. of PolInSAR 2007, Frascati, Italy, 2007: 1-8.
- [8] Cloude S R and Papathanassiou K P. Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry[J]. *IEEE Proceeding of Radar Sonar Navigation*, 2003, 150(3): 125-134.
- [9] Treuhaft R N and Siqueira P R. Vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar[J]. *Radio Science*, 2000, 35(1): 141-177.
- [10] Garestier F, Dubois-Fernandez P C, and 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.
- [11] 陈兵. 干涉与极化干涉合成孔径雷达信号处理技术研究[D]. [博士论文], 中国科学院电子学研究所, 2008.
Chen Bing. Study on interferometric and polarimetric interferometric synthetic aperture radar signal processing[D]. [Ph. D. dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [12] Reigber A, *et al.* Multi-baseline coherence optimisation in partial and compact polarimetric modes[C]. Proc. of IGARSS 2008, Boston, USA. IEEE, 2008, Vol. 2: 597-600.
- [13] Cloude S R and Papathanassiou K P. Polarimetric optimisation in radar interferometry[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(13): 1176-1178.
- [14] Tabb M, *et al.* Phase diversity: a decomposition for vegetation parameter estimation using polarimetric SAR interferometry[C]. Proc. of EUSAR 2002, Cologne, Germany, 2002: 1-4.
- [15] Tan L and Yang R. Investigation on tree height retrieval with polarimetric SAR interferometry[C]. Proc. of IGARSS '08, Boston, USA. IEEE, 2008, Vol. 5: 546-549.
- [16] Flynn T, Tabb M, and Carande R. Coherence region shape extraction for vegetation parameter estimation in polarimetric SAR interferometry[C]. Proc. of IGARSS'02, Toronto, Canada, IEEE, 2002: 2596-2598.
- [17] ESA. PolSARproSim [EB/OL], <http://earth.esa.int/polsarpro/default.html>. 2009.

谈璐璐: 女, 1984年生, 博士生, 研究方向为极化与简缩极化干涉 SAR 信息处理。

杨立波: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为微波成像技术及应用。

杨汝良: 男, 1943年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为星载和机载合成孔径雷达系统。