

## 基于 PolInSAR 相干区域的最优正规矩阵近似解的地形与树高估计

孙宁霄<sup>①</sup> 吴琼之<sup>\*②</sup> 孙林<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(北京理工大学光电学院 北京 100081)

<sup>②</sup>(北京理工大学信息与电子学院 北京 100181)

**摘要:** 森林区域林下地形及树高的反演是极化干涉雷达的一个重要应用。该文首先对极化干涉 SAR 数据的相干区域进行建模及运用最优正规矩阵近似干涉互相关矩阵, 得到白化正规干涉互相关矩阵。白化正规干涉互相关矩阵的相干区域为一条直线, 任意求得两个不同极化状态下的相干系数进行直线拟合, 完成地表的估计, 再结合体散射去相干与树高之间的关系, 运用查表方法完成树高的估计。该方法回避了传统方法中求解所有极化状态下的相干系数估计及相干区域边缘提取的步骤, 在简化参数反演提升估计效率的同时获得正确地表与树高估计, 最后运用仿真数据完成算法有效性与可靠性的验证。

**关键词:** 极化干涉合成孔径雷达; 相干区域; 最优正规矩阵近似; 地形与树高反演

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)05-1051-07

DOI: 10.11999/JEIT160774

## Topography and Tree Height Estimation Based on the Best Normal Matrix Approximation for PolInSAR Coherence Region

SUN Ningxiao<sup>①</sup> WU Qiongzhi<sup>②</sup> Sun Lin<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

<sup>②</sup>(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The inversion of topography and tree height in forest area is one of the most important applications in the Polarimetric SAR Interferometry (PolInSAR). In this paper, the coherent region of the PolInSAR data is modeled and the best normal matrix is used to approximate the cross correlation matrix, further, the whitened interferometric cross-correlation matrix is obtained. The coherence region of the whitened interferometric cross-correlation matrix is a straight line. Two arbitrary coherences obtained under two different polarization states can be applied to fitting a straight line. Based on the fitting line, the topographical phase can be estimated successfully. Referring to the relationship between the volume scattering and the tree height, look-up table method is used to search the correct tree height. The proposed method can avoid the complex steps of the traditional method, which needs to solve all the coherences under different polarization states to obtain the edge of the coherent region. The proposed method simplifies the inversion procedure and improves the efficiency of inversion, meanwhile, achieves the correct topography as well as the tree height. Finally, the simulation data are applied to validating the validity and reliability of the proposed method.

**Key words:** Polarimetric SAR Interferometry (PolInSAR); Coherent region; Best normal matrix approximation; Topography and tree height inversion

### 1 引言

近年来随着雷达技术快速发展, 极化雷达已广泛应用于航天控制、军事探测、目标检测、林业遥感、环境监督等众多领域。极化干涉雷达 (Polarimetric SAR Interferometry, PolInSAR) 通过对极化技术与干涉技术相结合, 既具有干涉 SAR 获取散射体位置、分布、运动、变化信息的

能力, 也具有极化 SAR 对散射体结构、方向、对称性、纹理以及介电常数等敏感的特性<sup>[1]</sup>。它可以同时提取观测对象的空间 3 维结构特征信息和散射信息<sup>[2]</sup>, 广泛应用于林下地形估计<sup>[3]</sup>, 森林高度提取<sup>[4-6]</sup>及生物量反演<sup>[7,8]</sup>中。

经典的森林树高反演算法为 Cloude 和 Pathanassiou 提出的 3 阶段<sup>[4]</sup>反演算法, 该算法基于随机散射模型 (Radom Volume over Ground, RVoG) 模型<sup>[9]</sup>, 根据 RVoG 二层散射模型理论, 极化干涉数据的不同相干系数应分布在一条直线, 但

由于噪声及时间去相关的影响, 再加之没有足够的多视处理, 使得实际的极化干涉数据的相干系数分布在一个区域内称之为相干区域。目前树高反演过程大致分为 3 个步骤, 首先根据相干系数进行直线拟合, 其次, 根据拟合直线及地形判别准则估计地表相位, 最后完成体散射去相干及树高的估计。直线拟合误差会直接影响到相位估计精度, 进而影响到树高估计, 因此参数反演的首要任务就是精确地拟合直线。许多文献直线估计方法不同, 例如文献[4]采用最小二乘法对相干系数进行直线拟合, 这种拟合方法存在仅考虑自变量中的误差没有考虑因变量误差的缺陷<sup>[10,11]</sup>; 文献[3]需要求解干涉矩阵的相干区域, 根据相干区域最长轴估计直线, 相干区域计算比较复杂, 且长轴估计也存在偏差<sup>[1]</sup>。

理论研究表明, 极化干涉数据的相干区域为干涉互相关矩阵的数值区域, 在无噪声及时间去相干影响, 并且有足够大的多视处理时, 观测干涉互相关矩阵变成白化干涉互相关矩阵, 其相干区域为一条直线。然而实际数据处理中, 因为场景的各向异性不可能进行非常大多视处理。为此文献[12]提出了运用最优正规矩阵近似极化干涉数据相干区域方法, 可得到正确的白化正规干涉互相关矩阵。本文采用最优化正规矩阵近似方法进行干涉互相关矩阵的求解, 省去相干区域求解的繁琐过程, 避开最小二乘直线拟合的缺点, 根据最优正规矩阵进行地形与树高的估计, 并与经典算法估计的结果进行对比与分析。

## 2 极化干涉与相干区域介绍

### 2.1 极化干涉理论

极化干涉 SAR 系统, 基线两端每个天线都可以获得 4 个极化通道的复图像数据。极化通道数据经过幅度和相位平衡校正后并考虑散射对称性 ( $S_{lv} = S_{vh}$ ), 基线两端回波数据可以分别用目标散射矢量  $\mathbf{k}_1$  和  $\mathbf{k}_2$  表示。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{k}_1 &= \begin{bmatrix} S_{hh1} + S_{vv1} & S_{hh1} - S_{vv1} & 2S_{hv1} \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{k}_2 &= \begin{bmatrix} S_{hh2} + S_{vv2} & S_{hh2} - S_{vv2} & 2S_{hv2} \end{bmatrix}^T \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由  $\mathbf{k}_1$  和  $\mathbf{k}_2$  的顺序组合, 可以得到 6 维复散射矢量, 计算该矢量与自身共轭转置的外积, 可以得到  $6 \times 6$  的极化干涉互相关矩阵  $\mathbf{T}_6$ :

$$\mathbf{T}_6 = \left\langle \begin{bmatrix} \mathbf{k}_1 \\ \mathbf{k}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{k}_1^H & \mathbf{k}_2^H \end{bmatrix} \right\rangle = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{11} & \boldsymbol{\Omega}_{12} \\ \boldsymbol{\Omega}_{12}^H & \mathbf{T}_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\mathbf{T}_{11}$  和  $\mathbf{T}_{22}$  是  $3 \times 3$  极化 Hermitian 自相关矩阵, 分别用于描述各图像的极化特征。  $\boldsymbol{\Omega}_{12}$  为干涉互相关矩阵, 它为  $3 \times 3$  非 Hermitian 矩阵, 包含了两个目标

矢量  $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$  之间的极化与干涉相关性信息。值得注意的是, 该  $6 \times 6$  的极化干涉矩阵是半正定的 Hermitian 矩阵, 具有实数非负特征值和正交的特征矢量。

### 2.2 极化干涉相干系数

通过将两个散射目标矢量分别投影到两个定义的单位复矢量  $\mathbf{w}_1$  和  $\mathbf{w}_2$  上, 可以定义两个复数标度图像  $z_1 = \mathbf{w}_1^H \cdot \mathbf{k}_1$  和  $z_2 = \mathbf{w}_2^H \cdot \mathbf{k}_2$ , 两个复图像  $z_1$  和  $z_2$  是全极化散射矩阵元素的线性组合, 极化干涉复相干性可以表示为

$$\gamma(\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2) = \frac{z_1 z_2^*}{|z_1| |z_2|} = \frac{\mathbf{w}_1^H \boldsymbol{\Omega}_{12} \mathbf{w}_2}{\sqrt{\mathbf{w}_1^H \mathbf{T}_{11} \mathbf{w}_1 \cdot \mathbf{w}_2^H \mathbf{T}_{22} \mathbf{w}_2}} \quad (3)$$

主从图像获取时, 若没有时间差(同时获取, 没有时间去相干), 且对于小基线的干涉 ( $\mathbf{T}_{11} = \mathbf{T}_{22}$ )<sup>[13]</sup>, 此时复相干可简化为

$$\gamma(\mathbf{w}) = \mathbf{w}^H \boldsymbol{\Omega}_{12} \mathbf{w} / (\mathbf{w}^H \mathbf{T} \mathbf{w}) \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{w}$  是单位复矢量,  $\mathbf{T} = (\mathbf{T}_{11} + \mathbf{T}_{22})/2$ , 决定了基线两端的极化状态。新引入一个 3 维列矢量  $\mathbf{v} = \mathbf{T}^{0.5} \mathbf{w}$ , 则式(4)转化为

$$\gamma = \mathbf{v}^H \tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{12} \mathbf{v} / (\mathbf{v}^H \mathbf{v}) \quad (5)$$

其中,  $\tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{12}$  为白化干涉互相关矩阵  $\tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{12} = \mathbf{T}^{-0.5} \boldsymbol{\Omega}_{12} \mathbf{T}^{-0.5}$ 。

根据数学知识, 由式(5)可知, 不同极化状态下的相干系数的相干区域其实为  $\tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{12}$  的数值范围即  $F(\tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{12})$ , 相干区域仅依赖于白化干涉互相关矩阵, 矩阵的数值范围可定义为

$$F(\tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{12}) = \{ \mathbf{v}^H \tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{12} \mathbf{v}, \mathbf{v} \in \mathbb{C}^3, \|\mathbf{v}\| = 1 \} \quad (6)$$

特殊情况下, 如果  $\tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{12}$  是正规矩阵, 即  $\tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{12} \tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{12}^H = \tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{12}^H \tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{12}$ , 那么  $F(\tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{12})$  就是复平面内 3 个点组成的凸集, 该 3 个点分别对应白化干涉互相关矩阵的 3 个特征值。更特殊的情况是, 白化干涉互相关矩阵的 3 个特征值共线时, 矩阵的数值范围为严格的一条线。文献[14]中有定理证明, 如果  $\tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{12}$  的数值范围为一条直线, 那么它应该与一个 Hermitian 矩阵仿射等价, 即存在两个复数,  $a, b \in \mathbb{C}$  以及 Hermitian 矩阵  $\mathbf{A}$ , 使得  $\tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{12} = a\mathbf{A} + b\mathbf{I}$ 。本文将根据极化干涉 SAR 数据的互相关矩阵  $\tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{12}$  来计算与之最为接近的白化正规互相关矩阵  $\tilde{\boldsymbol{\Omega}}_{12}$ 。

## 3 RVoG 模型与最优化正规矩阵近似

### 3.1 RVoG 二层散射模型

RVoG 模型<sup>[4,9]</sup>是描述森林区域电磁波散射状况的二层散射结构模型, 表征了相干系数随垂直结构参数变化的规律, 该模型假定林区散射由地表散射和森林均匀体散射两部分组成。根据 RVoG 模型, 我们可以将观测的极化干涉 SAR 数据由森林

垂直结构参数表示。假定  $h_v$  表示树高， $\sigma_v$  表示植被消光系数， $\theta$  为雷达波入射角， $\varphi_0$  为地表相位， $k_z$  为竖直波束。则根据 RVoG 模型，观测得到的极化及干涉数据可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{T}_1 = \mathbf{T}_2 = (I_1 \mathbf{T}_{\text{vol}} + a \mathbf{T}_{\text{gro}}) \\ \mathbf{\Omega}_{12} = e^{j\varphi_0} (I_2 \mathbf{T}_{\text{vol}} + a \mathbf{T}_{\text{gro}}) \end{cases} \quad (7)$$

其中， $\mathbf{T}_p = \langle \mathbf{k}_p \mathbf{k}_p^H \rangle$  表示基线一端各自的自相关矩阵， $p = 1, 2$  代表主图像与从图像， $\mathbf{\Omega}_{12} = \langle \mathbf{k}_1 \mathbf{k}_2^H \rangle$  表示基线两端干涉矩阵。 $\mathbf{T}_{\text{vol}}$  表示仅有体散射引起的自相关矩阵， $\mathbf{T}_{\text{gro}}$  表示仅地表散射引起的自相关矩阵，且  $a, I_1, I_2$  为复系数。

基于 RVoG 模型，不同极化基下的相干系数  $\gamma$  在复平面上的分布为一条直线，也就是说白化干涉互相关矩阵  $\tilde{\mathbf{\Omega}}_{12} = \mathbf{T}^{-0.5} \mathbf{\Omega}_{12} \mathbf{T}^{-0.5}$  的数值范围为一条直线，因此白化干涉互相关矩阵必须为最优正规矩阵。实际地表相位为相干系数轨迹与复平面内单位圆的一个交点。进行相位补偿后可得到仅体散射的复相干  $\gamma_V, \gamma_V$  的数据表达式如(8)所示，其中  $h_v$  代表树高， $\sigma_v$  为消光系数， $\theta$  为入射角， $k_z$  为干涉竖直波束。

$$\gamma_V = \frac{(e^{jk_z h_v + 2\sigma_v h_v / \cos \theta} - 1)(2\sigma_v / \cos \theta)}{(e^{2\sigma_v h_v / \cos \theta} - 1)(jk_z + 2\sigma_v / \cos \theta)} \quad (8)$$

### 3.2 最优正规矩阵近似

上一小节说明，如果 PolInSAR 的相干矩阵为一条直线，那么白化干涉互相关矩阵一定是正规矩阵。但实际测量中，由于存在时间去相干、噪声去相干以及不充足的多视处理，使得测量的干涉矩阵不是正规矩阵，此时就需要估计一个正规矩阵，使之与测量干涉矩阵具有非常小的范数误差，即

$$\min_{\tilde{\mathbf{\Omega}}_{12}} \left\| \hat{\mathbf{\Omega}}_{12} - \tilde{\mathbf{\Omega}}_{12} \right\|_F \quad (9)$$

根据矩阵理论<sup>[14]</sup>，如果  $\hat{\mathbf{\Omega}}_{12}$  的数值范围为一条直线，那么它应该与一个 Hermitian 矩阵仿射等价，即存在两个复数， $a, b \in \mathbb{C}$  以及 Hermitian 矩阵  $\mathbf{A}$ ，使得  $\hat{\mathbf{\Omega}}_{12} = a\mathbf{A} + b\mathbf{I}$ 。文献[12]给出式(9)的详细推导过程。最优正规矩阵的估计步骤<sup>[12]</sup>如下：

(1) 根据测量干涉互相关矩阵  $\tilde{\mathbf{\Omega}}_{12}$  计算其实部与虚部矩阵，即

$$\mathbf{H}_1 = (\tilde{\mathbf{\Omega}}_{12} + \tilde{\mathbf{\Omega}}_{12}^H) / 2, \mathbf{H}_2 = (\tilde{\mathbf{\Omega}}_{12} - \tilde{\mathbf{\Omega}}_{12}^H) / 2j$$

(2) 计算中间系数变量， $A = 4\text{Tr}(\mathbf{H}_1^2)$ ， $B = -8\text{Tr}(\mathbf{H}_1 \mathbf{H}_2)$ ， $C = 4\text{Tr}(\mathbf{H}_2^2)$ ， $D = 4\text{Tr}(\mathbf{H}_1)$ ， $E = -4\text{Tr}(\mathbf{H}_2)$ ， $F = 3$ ；

(3) 计算  $X = (4AF - D^2 - 4CF + E^2) / 2$ ， $Y = 2BF - DE$ ， $\theta = [a \tan 2(Y, X) + \pi] / 2$ ， $\rho = -2F / (D \cos \theta + E \sin \theta)$ ， $z = \rho(\cos \theta + j \sin \theta)$ ；

(4) 最终根据求得的  $z$  得到估计的白化干涉互相关矩阵  $\hat{\tilde{\mathbf{\Omega}}}_{12}$ ， $\hat{\tilde{\mathbf{\Omega}}}_{12} = (z\tilde{\mathbf{\Omega}}_{12} - z^* \tilde{\mathbf{\Omega}}_{12}^H - \mathbf{I}) / (2z)$ 。

由于估计出的白化干涉互相关矩阵的相干区域为一条严格的直线，因此在进行地形与树高估计过程中获得直线的时候不再像以往求得所有相干系数。以往的算法大致分为两类：一类是求多个相干系数(包括  $\gamma_{hh}, \gamma_{hv}, \gamma_{vv}, \gamma_{\text{opt}1}, \gamma_{\text{opt}2}, \gamma_{hh-vv}, \gamma_{hh+vv}$  等等)，具体个数不等，根据求得多个相干系数进行直线拟合；另外一类算法是求得干涉互相关矩阵的相干区域边界，一般极化干涉 SAR 数据的相干区域为椭圆区域，椭圆区域的最长轴表示了直线分布趋势，根据椭圆最长轴进行直线拟合。我们现在只需求得两个不同极化极化状态下的相干系数进行直线拟合即可，大大提高了参数反演的效率。

## 4 地形与树高估计

第3节详细介绍了用于地形与树高参数反演的 RVoG 模型及 PolInSAR 相干区域最优正规矩阵近似求解方法。本节在上述基础上进行地形与树高的详细求解。

得到估计的最优在正规矩阵后，根据式(5)可以得到任意极化状态下的相干系数，例如  $\gamma_{hh-vv}$ ， $\gamma_{hv}$ ， $\gamma_{vv}$ ， $\gamma_{hh}$ ，在这里我们选取  $\gamma_{hv}$  和  $\gamma_{hh-vv}$ ，进行直线拟合。

这里我们之所以选取  $\gamma_{hv}$  和  $\gamma_{hh-vv}$ ，两参数进行直线拟合是因为研究表明  $\gamma_{hv}$  相干系数最接近树冠层，而  $\gamma_{hh-vv}$ ，相干系数更接近地表<sup>[4]</sup>。根据前文所述，拟合直线与单位圆有两个交点，其中一个交点为实际的地形相位点，根据  $\gamma_{hv}$  和  $\gamma_{hh-vv}$ ，距离实际地表相位的分布特点，我们可以轻易选取出实际地表相位点，即

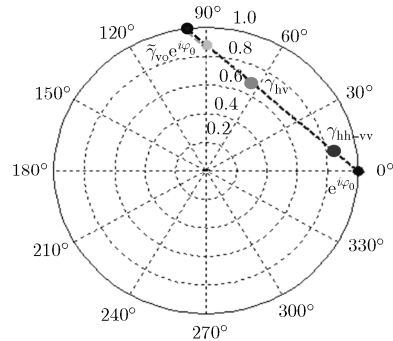


图1 最优正规矩阵的相干区域图

$$\phi_g = \begin{cases} \phi_1, & |\gamma_{lv} - e^{j\phi_1}| > |\gamma_{hh-vv} - e^{j\phi_1}| \\ \phi_2, & |\gamma_{lv} - e^{j\phi_1}| < |\gamma_{hh-vv} - e^{j\phi_1}| \end{cases} \quad (10)$$

获取了地形相位后，进行体散射去相关估计和建立查找表反演树高。一般假设在 HV 相干系数表征为仅体散射引起的相干系数，因此，体散射去相干的估计式为  $\gamma_V = \gamma_{lv}e^{-j\phi_g}$ 。

### 5 实验结果与分析

#### 5.1 地表平坦实验结果

我们用 PolSARProSim<sup>[15]</sup>软件仿真 L(1.3 GHz) 及 P(0.6 GHz) 波段全极化干涉数据，入射角为 45°。仿真松树高度为 20 m，森林密度 50 stem/Ha。地表干涉相位为 0 rad。水平基线 10 m，垂直基线 1 m。仿真场景的 Pauli 图如图 2 所示。首先按照第 3.2 节中的方法对全极化干涉互相关矩阵进行最优化正规矩阵近似。然后采用第 4 节中地形与树高估计方法进行参数反演。

首先看地表相位估计。我们取场景中间一条方位向数据进行定量分析。估计的结果如图 3 所示，估计值平均值与标准差如表 1 所示。

表 1 P, L 波段地形估计统计分析

波段	平均值(m)	标准差(m)	真值(m)
L 波段	0.09	0.22	0
P 波段	0.05	0.09	0

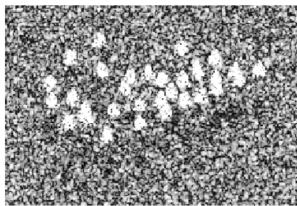
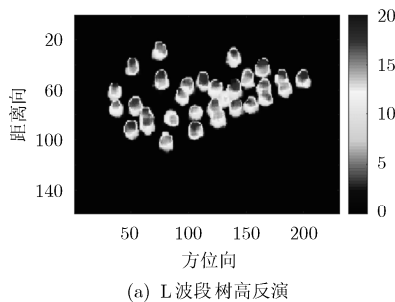


图 2 仿真场景 Pauli 分解图



通过图 4 与表 1 的估计结果及统计结果可以看到，估计结果非常接近真值，且我们也观察到 P 波段的估计结果要优于 L 波段，这是因为 P 波段波长较长更容易穿透森林到达地表，从而地表处获取相位估计较精确。

我们对整个场景中树高进行估计，估计结果如图 4 所示。由图 4(a)可以看出，场景中一颗颗松树都能很好地区分开来，松树的形状呈圆锥形，顶端细尖，下端四周扩展，从估计的结果也能观察到这一特点，估计的每一颗松树顶端高度在 20 m 左右，下端四周扩展高度下降。取每一颗松树的顶端高度作统计分析，L 波段下估计树高平均值为 19.14 m (真实树高为 20 m)，标准差为 0.94 m，估计结果接近真值，松树间隙处为裸地，其高度为仿真数据时设置的 0 m，由此验证了参数估计的准确性。P 波段干涉数据可能较好地反演每一颗松树的高度，但与 L 波段相比其反演树高的高度较低，估计的树高普遍在 16 m 左右。取每一颗松树顶端高度作统计分析，P 波段下估计树高平均值为 16.45 m，标准差为 1.95 m；这同样也是因为 P 波段穿透性较强，地面散射能量较强从而导致体散射去相干相位较低，最终使得估计的树高偏低，而且不稳定。虽然 P 波段地形相位估计较精确，但带来较差的树高反演结果，因此通过 L 与 P 波段的对比，L 波段数据是能够实现林区垂直参数反演较好的选择。

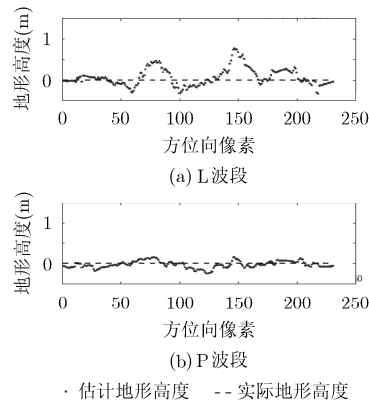


图 3 估计地表高度与实际地表高度对比图段

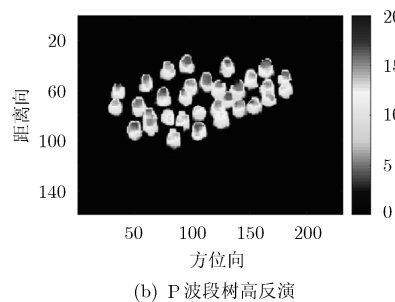


图 4 树高反演

5.2 地表崎岖有坡度

同样运用 PolSARpro 仿真软件仿真含有坡度的全极化干涉数据，除了地形坡度及森林密度外，其余仿真参数都与第 5.1 节一致，我们仿真 2 组 L 波段(分别为方位向存在坡度，距离向存在坡度)，两组 P 波段含有坡度的数据。这里我们仿真的森林密度为 360 stem/Ha。将数据首先进行最优正规矩阵近似得到白化干涉互相关矩阵，然后进行地表与树高估计。估计结果如图 5 所示。

含有坡度时地表相位估计结果如图 5，其中，图 5(a)为斜距向存在斜坡时估计结果，图 5(b)为方位向存在斜坡时估计的地形高度结果。由图 5 所示，无论是方位向还是距离向存在坡度时，也即地表地伏变化时，该方法仍然能获得正确地形估计结果，对其进行定量分析，估计平均误差如表 2，表 3 所示。

通过图 5 及表 2，表 3 可知，当地形起伏时，运用最优正规矩阵近似方法仍能获得正确地形，再

表 2 距离向存在坡度时估计结果

波段	平均误差 (m)	标准差 (m)
L 波段	0.15	0.25
P 波段	0.11	0.21

表 3 方位向存在坡度时估计结果

波段	平均误差 (m)	标准差 (m)
L 波段	0.18	0.37
P 波段	0.15	0.29

次验证了本文方法的可行性与稳定性。

接下来进行树高估计，这里我们以地形为参考点，且仅呈现方位向存在坡度时估计的树高，斜距向存在坡度时仍能得到相似的结果，这里不再展示。方位向地形起伏时获得的树高(去掉起伏地形影响)估计结果如图 6 所示。由图 6 可以看出，当地形起伏时，估计的树高与地形平坦时结果一致，L 波段估计树高仍然最优平均树高在 19 m 左右，P 波段树高估计偏差较大，平均树高在 16 m 左右，且起伏较大，这不是因为地形引起的，而是电磁波能量大部分穿透森林到达地面使得体散射相位中心降低，导致估计结果没有 L 波段稳定正确，也再一次验证了 L 波段数据是能够实现林区竖直参数反演较好的选择。

5.3 与传统方法对比分析

传统求解地形高度及树高方法中最典型是求解极化干涉 SAR 数据相干区域，根据相干区域最长轴进行直线拟合，得到拟合直线与单位圆有两个交

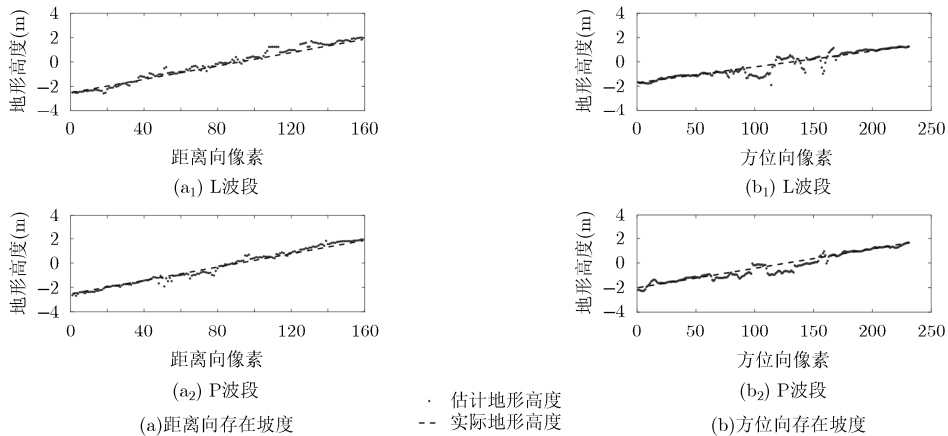


图 5 存在坡度时估计的地形高度

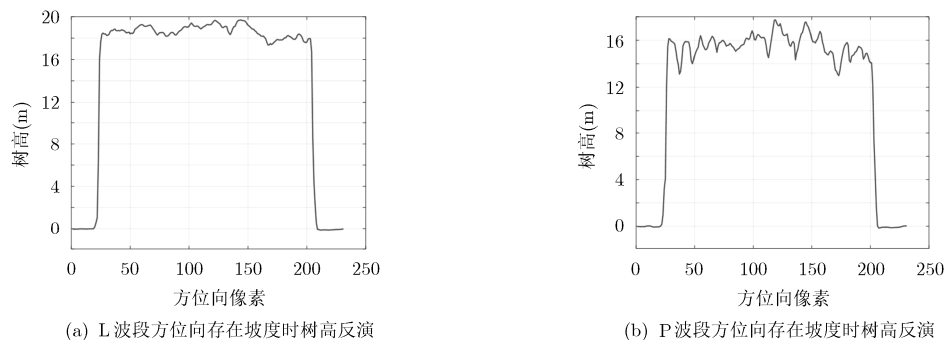


图 6 地形起伏时树高反演

点, 根据式(15)地形判别准则, 获得实际地表相位, 并采用 HV 通道相干系数作为体散射去相干估计运用查表法获得树高。

仍采用与 5.1 节相同的数据(地形平坦无坡度)进行地形与树高估计实验。抽取其中一条方位线的数据进行分析。估计的结果如图 7 所示。传统地形高度提取方法估计的结果在真值 0 m 左右, 误差也较小, 尤其 P 波段估计结果优于 L 波段。但与本文方法的提取的结果相比(图 3), 无论是 L 波段还是 P 波段数据, 传统方法估计的结果不稳定, 起伏较大, 估计误差较大。本文也进行了定量的统计分析。对于 L 波段数据, 传统方法提取的地形高度误差平均值为 0.14 m, 标准差 0.37 m, 而本文方法估计的结果平均误差仅为 0.09 m, 标准差为 0.22 m。对于 P 波段, 传统方法提取的地形高度平均误差为 0.09 m, 标准差为 0.15 m, 而本文方法估计误差仅为 0.05 m, 标准差仅为 0.09 m。通过详细

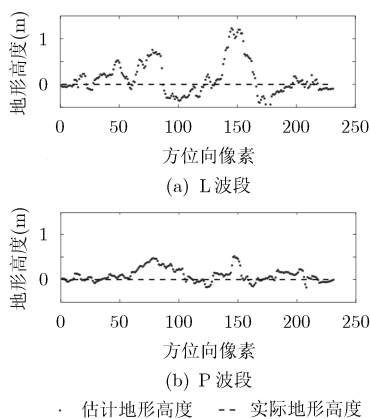


图 7 传统方法估计地表高度与实际地表高度对比图

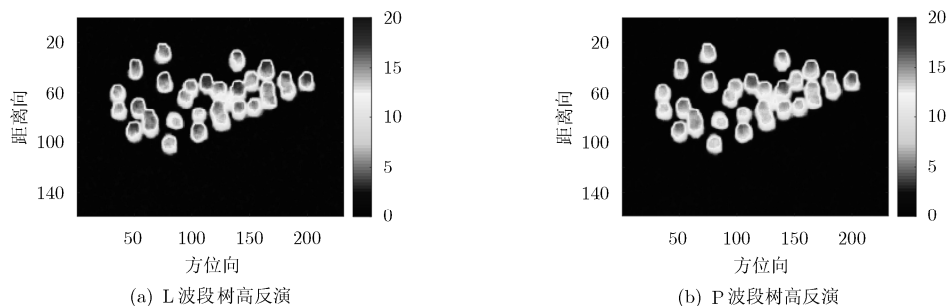


图 8 传统方法估计树高场景图

定量统计分析可以看出, 本文方法估计地形高度精度较高, 远优于目前传统地形估计方法。

传统方法估计树高结果如图 8 所示。从图中来看, 由颜色表可知传统方法估计树高对应颜色表较浅, 即树高低于本文估计结果。仍然取每一颗松树最高点作为树高定量分析。统计结果表明, 对于 L 波段, 传统方法估计树高平均值为 18.02 m(比本文方法估计结果约低 1.00 m), 偏差也相对较大, 传统方法估计结果标准差为 1.51 m。对于 P 波段, 传统方法估计树高较低, 仅为 15.56 m(比本文方法估计结果约低 1.00 m), 标准差本文估计结果的标准差要大。由此也验证了本文方法在树高估计的有效性。

综上所述, 通过将传统方法参数估计结果与本文方法参数估计结果对比分析, 可以看到无论是地形反演还是树高估计, 本文估计方法的估计结果都比传统方法估计结果的精度要高, 由此验证本文算法的有效性及其正确性。

## 6 结论

本文首先对极化干涉 SAR 数据的相干区域进行建模及运用最优正规矩阵近似干涉互相关矩阵, 得到白化正规干涉互相关矩阵。根据求得的最优正规矩阵的相干区域为一条直线这一理论, 任意求得两个不同极化状态下的相干系数进行直线拟合, 完成地表的估计, 再结合体散射去相干与树高之间的关系, 运用查表方法完成树高的估计。本文方法回避了传统方法中求解所有极化状态下的相干系数估计及相干区域边缘提取的步骤, 在简化参数反演提升估计的效率的同时获得正确地表与树高估计。

## 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]. 电子与信息学报, 2007, 29(5): 1258-1262.  
WU Yirong, HONG Wen, and WANG Yanping. The current status and implications of polarimetric SAR interferometry[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(5): 1258-1262.
- [2] GUO S L, LI Y, HONG W, et al. Modification of polarimetric SAR interferometry target decomposition with accuracy topography[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(7): 1476-1480. doi: 10.1109/

- LGRS.2015.2409311.
- [3] GUO S L, LI Y, YIN Q, *et al.* Estimation of ground topography under forests with polarimetric SAR interferometry[C]. 2015 IET Radar Conference, Hangzhou, China, 2015: 1-6.
- [4] CLOUDE S R and PAPATHANASSIOU K P. Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(3): 125-134. doi: 10.1049/ip-rsn:20030449.
- [5] GARESTIER F, DUBOIS-FERNANDEZ P C, and PAPATHANASSIO 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. doi: 10.1109/TGRS.2007.907602.
- [6] 郭胜龙, 李洋, 洪文, 等. 基于简缩极化干涉 SAR 数据的森林垂直结构参数反演[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(1): 71-79. doi: 10.11999/JEIT150394.
- GUO Shenglong, LI Yang, HONG Wen, *et al.* Vertical parameters estimation of forest with compact polarimetric SAR interferometric data[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(1): 71-79. doi: 10.11999/JEIT150394.
- [7] METTE T. Forest biomass estimation from polarimetric SAR interferometry[D]. [Ph.D. dissertation], Germany: Technische Universitaet Muenchen, 2006.
- [8] 冯琦, 陈尔学, 李增元, 等. 基于机载 P-波段全极化 SAR 数据的复杂地形森林地上生物量估测方法[J]. *林业科学*, 2016, 52(3): 10-22. doi: 10.11707/j.1001-7488.20160302.
- FENG Qi, CHEN Erxue, LI Zengyuan, *et al.* Forest above-ground biomass estimation method for rugged terrain based on airborne P-band PolSAR data[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(3): 10-22. doi: 10.11707/j.1001-7488.20160302.
- [9] TREUHAF T R N and SIQUEIRA P R. The vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar[J]. *Radio Science*, 2000, 35(1): 141-177. doi: 10.1029/1999RS900108.
- [10] 丁克良, 沈云中, 欧吉坤. 整体最小二乘法直线拟合[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2010, 29(1): 44-47. doi: 1008-0562(2010)01-0044-04.
- DING Keliang, SHEN Yunzhong, and OU Jikun. Methods of line-fitting based on total least squares[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2010, 29(1): 44-47. doi: 1008-0562(2010)01-0044-04.
- [11] 许丽颖, 李世强, 邓云凯, 等. 基于极化干涉 SAR 反演植被高度的改进三阶段算法[J]. *雷达学报*, 2014, 3(1): 28-34. doi: 10.3724/SP.J.1300.2014.13089.
- XU Liying, LI Shiqiang, DENG Yunkai, *et al.* Improved three-stage algorithm of forest height retrieval with PolInSAR[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(1): 28-34. doi: 10.3724/SP.J.1300.2014.13089.
- [12] YI C, YAMAGUCHI Y, YAMADA H, *et al.* PolInSAR coherence region modeling and inversion: The best normal matrix approximation solution[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2015, 53(2): 1048-1060. doi: 10.1109/TGRS.2014.2332553.
- [13] CLOUDE S R. Polarisation: Applications in Remote Sensing[M]. Oxford University Press, 2009.
- [14] ZACHLIN P F and HOCHSTENBACH M E. On the numerical range of a matrix[J]. *Linear Multilinear Algebra*, 2008, 56(1): 185-225.
- [15] POTTIER E. ProSARPro\_v4.2.0[OL]. <https://earth.esa.int/web/polsarpro>, 2012.
- 孙宁霄: 男, 1987年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达信号处理及成像算法、极化 SAR 理论研究与应用。
- 吴琼之: 男, 1977年生, 讲师, 博士, 研究方向为雷达信号处理与存储、合成孔径雷达成像算法。
- 孙林: 男, 1987年生, 讲师, 研究方向为合成孔径雷达系统设计。