

# 基于PolInSAR的植被区高精度数字表面模型反演方法

解金卫 索志勇\* 李真芳 王跃锟

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 针对传统方法无法估计电磁波在植被中的穿透深度导致植被数字表面模型(DSM)反演误差较大的问题, 该文提出一种高精度DSM估计方法。该方法首先通过极化干涉相干最优中最大化相位差法分离得到电磁波在植被中高、低散射相位中心的干涉相位。然后提出一种归一化高、低散射相位中心高度随消光系数变化的模型, 基于该模型搜索得到电磁波在植被中的最浅穿透深度。最后利用干涉处理方法得到高散射相位中心的高程, 将最浅穿透深度补偿到该高程中, 从而提升植被区DSM估计精度。利用PolSARpro软件在不同植被种类和不同植被高度下进行仿真试验以及机载全极化数据进行实测数据试验, 试验结果表明该方法能有效提高植被区DSM反演精度。

**关键词:** 极化干涉; 散射相位中心; 穿透深度; 数字表面模型

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)02-0293-09

DOI: 10.11999/JEIT180387

## High-precision Digital Surface Model Inversion Approach in Forest Region Based on PolInSAR

XIE Jinwei SUO Zhiyong LI Zhenfang WANG Yuekun

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** The general method for inversion of Digital Surface Model (DSM) in forest region has great errors due to the inestimable waves' penetration depth. For this problem, an approach to inversion of high-precision DSM is proposed. First, the phases of high and low scattering phase centers of the waves in forest are obtained by maximizing the phase separation of the coherence optimization. Then, the normal height variation models of the high and low scattering centers with extinction factors are constructed. According to the models, the least penetration depth of the waves in forest is acquired. Eventually, by implementing the interferometric technique on the phase of high scattering phase center, a coarse DSM is retrieved, and a high-precision DSM is developed by compensating the least penetration depth to the coarse one. The validation of the method is investigated by simulated datasets of PolSARpro under different tree species and different forest heights and by airborne real datasets. It shows that the proposed method can improve the accuracy on the inversion of DSM effectively in forest region.

**Key words:** Polarimetric interferometry; Scattering phase center; Penetration depth; Digital Surface Model (DSM)

### 1 引言

干涉合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)是获取全球数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的一种有效方法<sup>[1]</sup>。DEM包含两种高程模型<sup>[2]</sup>, 一种是没有任何植被、建筑物或者其他物体的裸露地表的高程, 称为数字

地形模型(Digital Topography Model, DTM)。另一种是记录任何位置的表面高程, 可以是植被区或者建筑区的表面高程, 也可以是没有植被或其它物体的地面, 称之为数字表面高程(Digital Surface Model, DSM)<sup>[3]</sup>。极化干涉合成孔径雷达(Polarimetric Interferometry Synthetic Aperture Radar, PolInSAR)是获取高精度DSM的一种重要手段, 对于地形复杂地区地理测绘具有重要意义。

文献<sup>[4,5]</sup>利用HH极化通道的干涉相位进行干涉处理得到植被区域DSM, 在植被密集区域得到的结果与真实DSM较为吻合, 但是对于植被较为稀疏的区域结果受植被形态影响较大, 其反演误差

收稿日期: 2018-04-26; 改回日期: 2018-09-11; 网络出版: 2018-09-25

\*通信作者: 索志勇 zysuo@xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61471276, 61671355, 61601298)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61471276, 61671355, 61601298)



位对应的高度称体散射相位中心(Volume Scattering Phase Center, VSPC)高度。在假设地面高程为零的情况下, VSPC高度对应最大化相位差方法分离得到的HSPC相位反演得到的高程。考虑体散射复相干系数相位与高度关系, 将体散射复相干系数幅度和相位分离。对于分离出的体散射复相干系数相位 $\Delta\varphi$ , 得到一个相对高度。

$$P_c = \Delta\varphi / (k_z \cdot h_v) \quad (3)$$

称为归一化VSPC高度。为了便于理解, 将体散射复相干系数进行变换后分析两种不同消光系数下归一化VSPC高度的边界情况, 一种是消光系数趋于0 dB/m, 另一种是消光系数趋于无穷大。

$$\begin{aligned} \gamma_V &= \frac{\sigma_m h_v}{\exp(\sigma_m h_v) - 1} \exp\left(\frac{ik_z h_v + \sigma_m h_v}{2}\right) \\ &\quad \cdot \text{sinc}\left(\frac{k_z h_v - i\sigma_m h_v}{2}\right) \\ &= \frac{1}{1 + ik_z \sigma_m^{-1}} \frac{\exp(ik_z h_v) - 1 / \exp(\sigma_m h_v)}{1 - 1 / \exp(\sigma_m h_v)} \quad (4) \end{aligned}$$

当 $\sigma \rightarrow 0$  dB/m时, 由式(4)中间部分等式可以得到 $\gamma_V = C_1 \exp\left(\frac{ik_z h_v}{2}\right)$ ,  $C_1$ 为幅度项。此时, 由体散射复相干系数相位知,  $P_c$ 等于0.5, 即VSPC位于植被体层的一半处。当 $\sigma \rightarrow \infty$ 时, 由式(4)右边部分等式可以得到 $\gamma_V = \exp(ik_z h_v)$ , 此时 $P_c$ 等于1,

VSPC位于植被冠层顶部。

在给定垂直有效波束的情况下, 根据式(3)可以得到不同植被高度归一化VSPC高度随消光系数变化的关系。可知, 不同植被高度下归一化VSPC高度均大于0.5, 而且随着消光系数的增大VSPC逐渐向植被冠层顶部移动, 植被越高VSPC移动的越快。

由式(3)知, 描述归一化VSPC高度与消光系数之间关系的数学表达式较为复杂。为了直观表达二者之间相对关系, 利用关于消光系数的高阶多项式进行拟合近似得到归一化VSPC高度随消光系数变化的曲线模型。图1分别给出3阶、5阶和10阶多项式拟合VSPC模型曲线, 并给出理论模型与拟合模型间的残差。由图1知, 拟合多项式阶次越高, 拟合模型越接近理论模型。考虑其极限情况, 可得到拟合模型如式(5):

$$P_c' = a_0 + a_1\sigma + a_2\sigma^2 + \dots + a_n\sigma^n + \dots \quad (5)$$

其中,  $a_0, a_1, \dots, a_n$ 为常数,  $n$ 为阶次,  $n \rightarrow \infty$ 。

实际中, 式(5)所示无穷阶多项式模型在工程应用中难以实现。由理论归一化VSPC模型变化趋势结合指数函数泰勒级数展开形式, 假设归一化VSPC高度与消光系数关系可近似为如式(6)所示指数模型:

$$\begin{aligned} P_h = \Delta\varphi / (k_z \cdot h_v) &= a_0 + a_1\sigma + a_2\sigma^2 + \dots \\ &+ a_n\sigma^n + \dots \approx 1 - 0.5e^{-a\sigma^b}, \quad a > 0, b > 0 \quad (6) \end{aligned}$$

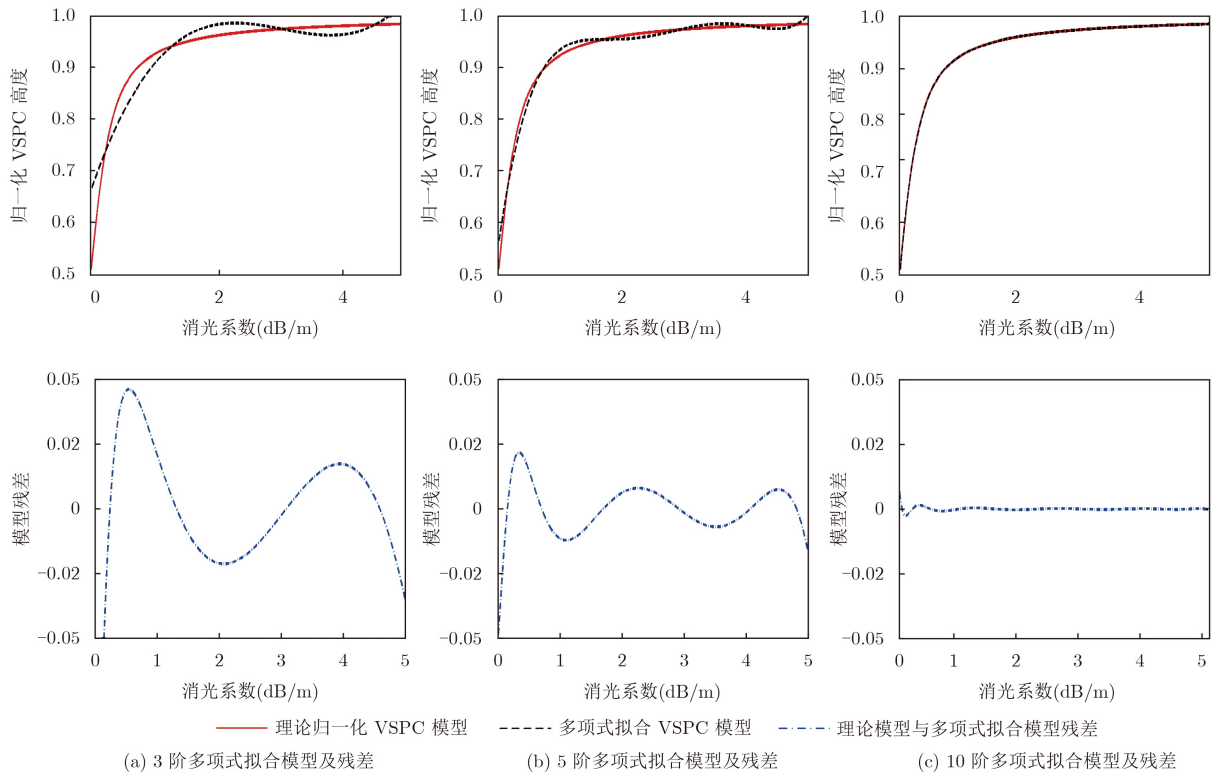


图1 不同阶次多项式拟合VSPC模型及残差曲线

其中,  $\sigma$ 为模型中的自变量, 即消光系数;  $a, b$ 为两个与植被高度有关的常数。简化的归一化VSPC模型取值范围满足 $[0.5, 1.0]$ 。为了区分后续所述LSPC, 这里将等效后的归一化VSPC高度称归一化HSPC高度。

实际中, 考虑归一化HSPC随着消光系数变化时是基于地体幅度比 $M(\mathbf{w})$ 为零的情况。对于LSPC, 当消光系数为零时, 地体幅度比 $M(\mathbf{w})$ 并不为零, 即有部分电磁波能量到达地面。LSPC在消光系数为零时接近地面, 即其归一化散射相位中心高度为0。而当消光系数无穷大时, 电磁波无法穿透植被, 此时植被中电磁波散射与极化状态无关, HSPC和LSPC相互重叠, 归一化LSPC高度为1。也就是说, 随着消光系数的增大, 分离的两个散射相位中心逐渐靠近, 并逐渐趋近于冠层顶部。因此, 两种散射相位中心随消光系数增大有相似的变化趋势, 但是由于取值范围不同, 变化的快慢有区别。目前的研究中植被区的地体幅度比无法直接获取, 分离的LSPC高度随消光系数变化关系也没有明确的模型。根据两种散射相位中心变化有相同趋势, 同样假设归一化LSPC变化满足指数型变化模型。模型中固定植被高度下对应常数相同, 只对指数项前的系数稍作修正使其满足归一化LSPC高度变化取值范围为 $[0, 1]$ 的情况。依据式(6)可得归一化LSPC高度变化模型如式(7):

$$P_l = 1 - e^{-a\sigma^b} \quad (7)$$

其中,  $a, b$ 为给定植被高度下对应与归一化HSPC高度模型相同的常数。

对于构建的两个指数模型, 关键在于如何准确求取模型中的常数 $a, b$ 。为了使构建的归一化HSPC指数模型以较小的误差逼近归一化VSPC高度, 建立如式(8)所示代价函数:

$$\left. \begin{aligned} \min_{a,b} F(a, b) &= \|P_h - \Delta\varphi/(k_z h_v)\|_2^2 \\ &= \left\| 1 - 0.5e^{-a\sigma^b} - \text{angle}(\gamma_V)/(k_z h_v) \right\|_2^2 \\ \text{s.t.} \quad &a > 0, b > 0, \sigma \in [0, +\infty) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中,  $\text{angle}(\cdot)$ 为取复数相位操作。式(8)代价函数的本质是一个多元非线性优化函数, 消光系数范围为 $\sigma \in [0, +\infty)$ 。由不同树下归一化VSPC高度随消光系数变化关系知, 对于常见的森林植被体中(植被高度20 m左右)当消光系数达到5 dB/m以上时VSPC几乎到达树冠顶部, 此时相位中心高度达到饱和, 继续增大消光系数, VSPC变化很小。因此, 在求解代价函数时将消光系数范围设为 $\sigma \in [0, 5]$  dB/m, 为了提高求解效率, 可将消光系

数以一定间隔离散化, 重新构建代价函数如式(9):

$$\left. \begin{aligned} \min_{a,b} F(a, b) &= \sum_{n=0}^N \left[ 1 - 0.5e^{-a\sigma_n^b} \right. \\ &\quad \left. - \text{angle}(\gamma_{v_n})/(k_z h_v) \right]^2 \\ \text{s.t.} \quad &a > 0, b > 0, \sigma_n < \sigma_{n+1}, \sigma_n \in [0, 5], \\ &n = 1, 2, \dots, N-1 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中,  $N$ 为消光系数的离散采样点数。通过优化<sup>[14]</sup>式(9)最终可得到使指数模型近似逼近归一化VSPC模型的最优 $a, b$ 值, 从而得到归一化HSPC和归一化LSPC高度随消光系数变化模型。根据表1给出的雷达几何参数, 由式(9)计算归一化HSPC在不同植被高度下的中误差(Root Mean Square Error, RMSE), 由此衡量拟合模型偏离理论模型的离散度。如图2所示, 植被高度在1~30 m时, 归一化HSPC模型的最大中误差为0.014, 误差不超过2%, 可见建立的指数模型引入的误差对DSM反演精度影响很小。

表1 雷达几何参数

参数名	参数值
雷达平台高度(m)	3000
有效基线长度(m)	6.33
雷达下视角( $^\circ$ )	45
雷达工作频率(GHz)	1.3

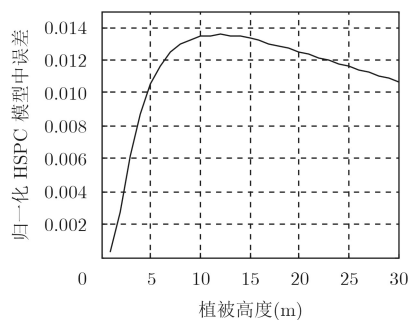


图2 归一化HSPC模型中误差

### 3.2 植被区电磁波最浅穿透深度估计

对于植被区, 在植被平均高度已知而植被下地表高程无法获取情况下, 如果能得到植被区的消光系数, 则可以获取归一化HSPC高度, 继而得到该消光系数下植被冠层顶部与HSPC高度之差, 即植被中电磁波的最浅穿透深度:

$$h_p = (1 - P_h) \cdot h_v \quad (10)$$

对于由最大化相位差最优化方法分离的干涉相位, 很容易得到分离的两种散射相位中心相对高度在不同相干系数幅度下的散点图, 将两个散射相位

中心散点相对高度差的平均值归一化后定义为相位中心高度差因子，如式(11)所示。

$$f = \text{mean}(\varphi_h/k_z - \varphi_l/k_z)/h_v, f \in [0, 0.5] \quad (11)$$

其中， $\varphi_h$ ， $\varphi_l$ 分别为HSPC和LSPC干涉相位， $\text{mean}(\cdot)$ 为求平均操作。

得到归一化HSPC和LSPC高度随消光系数变化的模型后，可以获得一系列对应消光系数下的归一化散射相位中心差。通过在归一化散射相位中心差中搜索得到的相位中心高度差因子，找出对应高度差因子下的消光系数 $\sigma_{ac}$ 。至此，由搜索得到的消光系数可以求出植被区归一化HSPC高度 $P_{ac}$ ，将 $P_{ac}$ 代入式(10)中即可得到植被区电磁波的最浅穿透深度。

### 3.3 植被区DSM估计

根据上述最大化散射相位中心差最优化方法分析和归一化HSPC, LSPC变化模型的构建，在植被平均高度已知而植被下地表高程无法获取情况下植被区高精度DSM估计步骤如下：

步骤1 最大化相位差最优化法分离植被区干涉相干系数：对植被区像素进行极化干涉相干矩阵估计，然后进行最大化相位差分离得到各个像素点处的HSPC干涉相位 $\varphi_h$ 和LSPC干涉相位 $\varphi_l$ ；

步骤2 归一化散射相位中心高度差因子计算：利用干涉相位(去平地效应后)和垂直有效波束之间的关系得到不同干涉相干系数幅度下分离的HSPC和LSPC相对高度的散点图。根据式(11)将两个散射相位中心散点的高度之差平均值归一化后得到相位中心高度差因子 $f$ ；

步骤3 模型建立及模型参数估计：利用式(6)，式(7)建立HSPC和LSPC归一化高度随着消光系数变化的模型。对于某一给定植被高度，通过求解式(9)所示的代价函数得到模型中的常数 $a$ ， $b$ ，从而得到归一化HSPC高度 $P_h$ 和归一化LSPC高度 $P_l$ 随消光系数变化模型；

步骤4 植被区消光系数确定：利用模型中归一化HSPC和LSPC相对高度差 $P_h - P_l$ 搜索归一化散射相位中心高度差因子 $f$ 所在位置，该位置对应消光系数值即电磁波在植被区域的消光系数 $\sigma_{ac}$ ；

步骤5 电磁波最浅穿透深度 $h_p$ 估计：将步骤4中得到的消光系数 $\sigma_{ac}$ 代入式(6)中得到植被区归一化HSPC高度 $P_{ac}$ ，再将 $P_{ac}$ 代入式(10)中可得到植被区冠层顶部与HSPC高度差，即为电磁波在植被中的最浅穿透深度 $h_p$ ；

步骤6 DSM估计：利用HSPC干涉相位 $\varphi_h$ 进行干涉处理得到粗DSM<sup>[15,16]</sup>，然后将得到的电磁波

在植被中最浅穿透深度 $h_p$ 补偿到粗DSM中得到最终的高精度DSM估计结果。

## 4 仿真实验结果与分析

利用欧空局研发的PolSARpr软件提供的L波段森林植被极化干涉SAR仿真数据对植被区高精度DSM反演方法进行验证。仿真数据植被类型选择阔叶林和针叶林代表不同树种类型。树木高度选择18 m和10 m代表典型的高植被和矮植被。雷达几何参数与表1相同，场景参数如表2所示。

表2 场景参数

参数名	参数值
树种类型	阔叶林/针叶林
植被高度(m)	18/10
树种密度(株/Ha)	600
距离向地形坡度(°)	0

以平均高度为18 m的阔叶林和平均高度为10 m的针叶林为例，下面给出植被中电磁波最浅穿透深度获取过程。图3(a)，图3(b)分别为18 m植被高度下利用最大化相位差最优化方法得到的HSPC和LSPC干涉相位结果。由于干涉相位与植被垂直有效波束关系得到不同相干系数幅度下两种散射相位中心相对高度散点图如图3(c)所示，图中散射相位中心散点的相干系数幅度大多集中在0.8~1.0之间，相干系数较低时，两相位中心差距较大，而构建的模型中理论上两散射相位中心差距不能大于植被高度的一半。因此，可舍弃相干系数小于0.8且两相位中心差距大于植被一半高度的散点。之后对两相位中心高度差求平均值，得到归一化相位中心高度差因子为0.16。图3(e)为在该植被高度下构建的归一化散射相位中心高度模型，优化得到参数 $a$ 为6.85， $b$ 为0.73。此时，在高度差因子为0.16时两散射相位中心差位于图3(e)中黑色线段部分，其对应消光系数为0.6 dB/m。由图3(f)可以得到消光系数为0.6 dB/m，植被高度为18 m时，植被最浅穿透深度为2.48 m。由于仿真数据设置的地形高程为零，可以由HSPC干涉相位与植被垂直有效波束关系直接得到HSPC的实际高度。图3(d)为场景中心方位线上HSPC干涉相位得到的HSPC实际高度，由此可知HSPC平均高程为16.10 m。补偿由模型得到的电磁波最浅穿透深度得到最终植被表面高程为18.58 m。因此，反演得到的DSM估计误差为 $18-18.58=-0.58$  (m)(负号表示补偿后冠层表面高程高于实际高程)。与实际高程相比，补偿后冠层高程误差为 $0.58/18=3.22\%$ ，误差小于4%。同样，

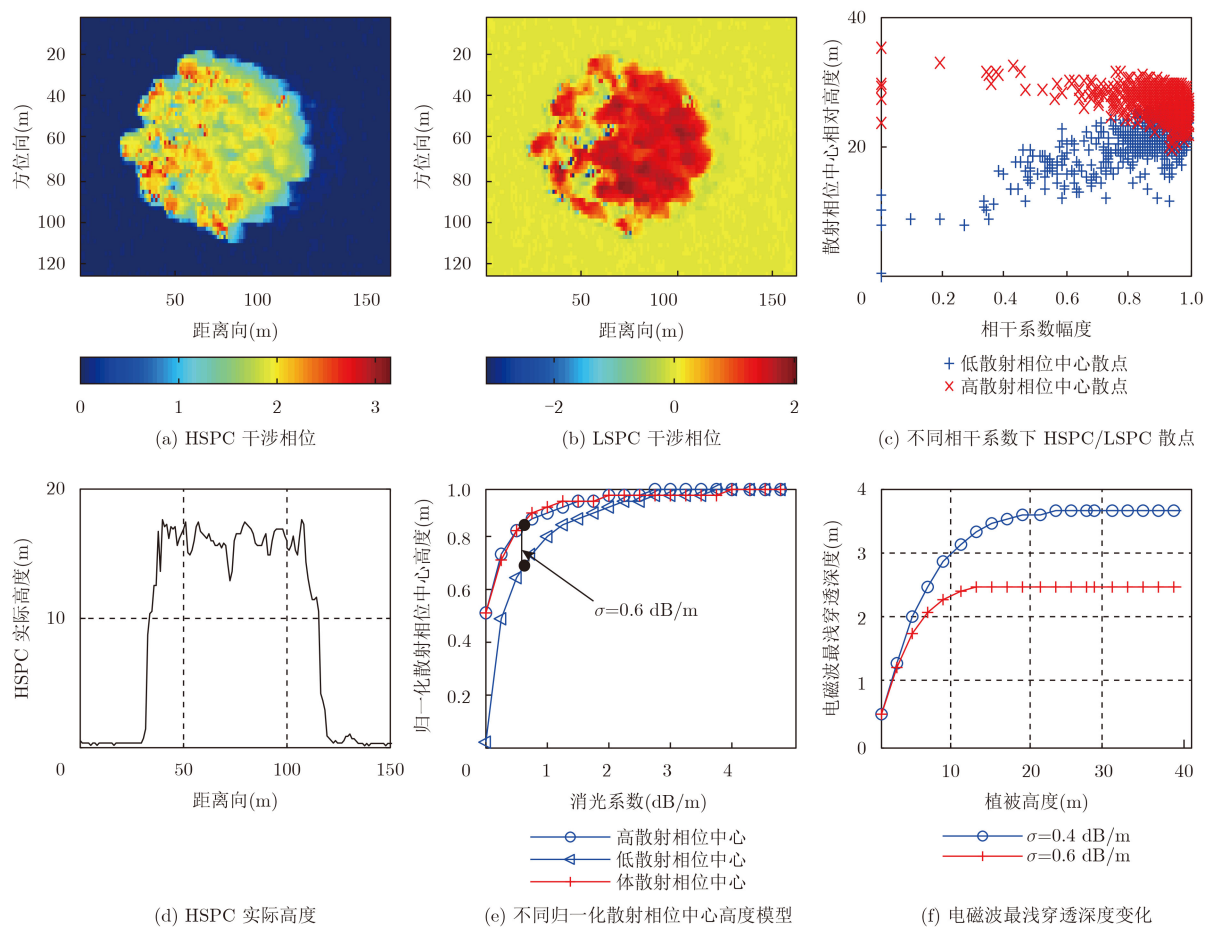


图 3 18 m 植被高度下电磁波最浅穿透深度估计过程

经过上述最浅穿透深度估计过程可以得到植被高度为 10 m 时高度差因子为 0.44, 如图 4(e) 中黑色线段部分, 对应消光系数为 0.05 dB/m, 由图 4(f) 得到消光系数为 0.05 dB/m, 植被高度为 10 m 时, 电磁波最浅穿透深度为 4.73 m。由图 4(d) 知 HSPC 平均高程为 5.06 m。因此, 由模型得到的电磁波最浅穿透深度补偿后的 DSM 估计误差为  $10 - 9.79 = 0.21$  (m)。与实际比, DSM 误差为  $0.21/10 = 2.1\%$ , 误差在 3% 内。仿真结果表明, 两种植被高度下, 通过建立的两个散射相位中心相对高度变化模型能够有效估计电磁波在植被中的最浅穿透深度, 从而得到高精度 DSM。

为了验证本文方法的有效性, 将文献[7]中利用数值半径法求解极化相干最优化相干系数从而生成 DSM 方法和文献[8]中利用联合干涉相位和相干性幅度的极化 SAR 最优相干性估计从而生成 DSM 方法以及本文方法得到的 DSM 进行对比。图 5 分别给出了针叶林和阔叶林中 18 m 和 10 m 两种植被高度情况下 3 种方法反演 DSM 结果。可以看出, 文献[7]和文献[8]两种 DSM 反演方法在不同树种不同树高下得到的结果与真实值相比均偏低; 相同树高下

这两种方法在针叶林中反演的 DSM 结果与在阔叶林中反演的 DSM 结果相比较差, 阔叶林反演结果更接近真实值, 这是由于阔叶林与针叶林相比其结构比例更接近波长, 电磁波在阔叶林中穿透性更差, 在植被中的有效散射相位中心更加接近植被表面。对比图 5(a) 和图 5(c) 以及图 5(b) 和图 5(d), 可以看出无论针叶林和阔叶林本文方法得到的 DSM 结果均更加接近真实 DSM。

为了进一步验证上述方法的有效性, 本文利用 X 波段下电磁波在稀疏森林区域的传播过程等效于 L 波段下电磁波在稠密森林区域的传播过程进行 DSM 反演验证, 即电磁波较难穿透植被层到达地表时用机载实测数据进行 DSM 反演验证。试验数据为中国渭南东部黄河滩地区机载 N-SAR 系统录取的全极化干涉数据, 该地区地势较为平坦, 随机采样测得地表平均海拔高度为 371 m, 该地区植被为大片人工种植树林, 较为稀疏, 随机采样测得树林平均高度为 19.29 m, 即植被区 DSM 平均高度为 390.29 m。图 6(a) 为该地区 Google Earth 光学图, 图 6(b) 对应全极化 SAR 数据 Pauli 基极化分解图。数据大小为  $8192 \times 4096$  像素。图 7 为图 6(b) 中红色线

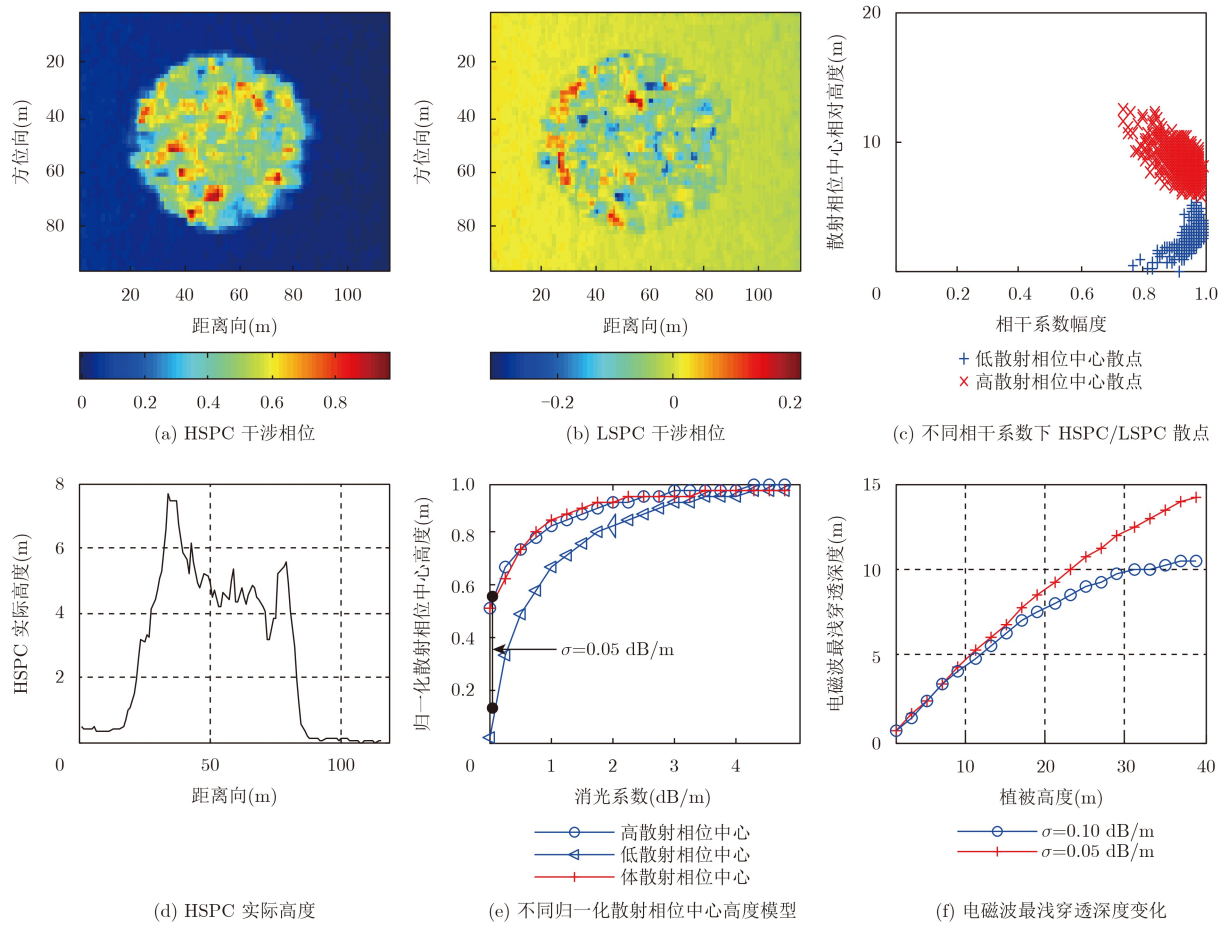


图 4 10 m 植被高度下电磁波最浅穿透深度估计过程

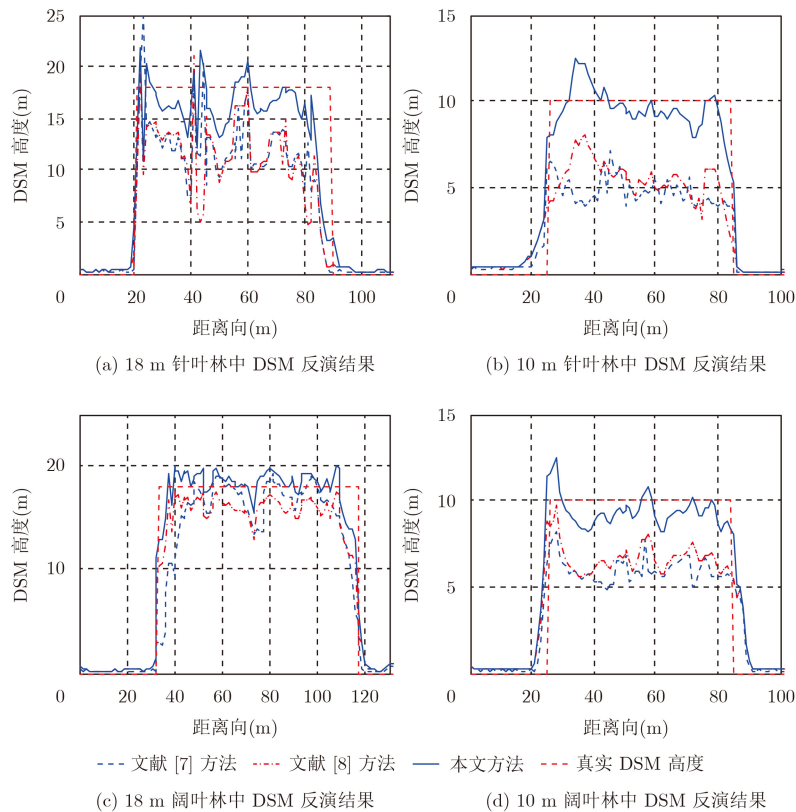
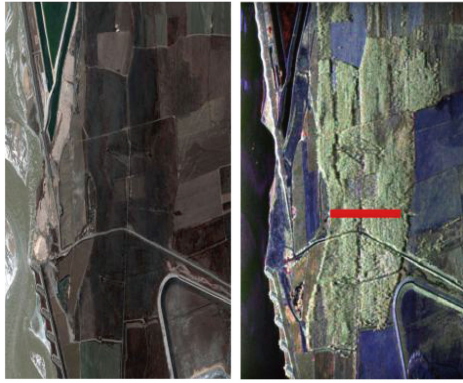


图 5 针叶林和阔叶林中两种植被高度下不同 DSM 反演结果对比



(a) Google Earth 光学 (b) Pauli 基极化分解图

图6 机载全极化试验数据

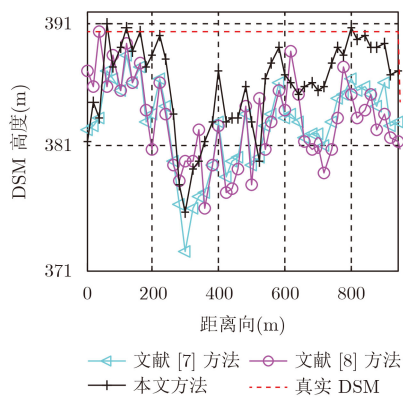


图7 不同方法机载全极化实测数据DSM反演结果对比

段部分数据不同方法下机载实测数据生成DSM结果的截面图。可以看出，不同方法反演得到的DSM结果较实际均偏低，文献[7]与文献[8]方法反演生成的DSM误差较大，而本文方法得到的DSM结果更加接近真实值。

## 5 结论

在植被平均高度已知而植被下地表高程无法获取情况下，为了解决植被区传统DSM反演方法精度低的问题，本文提出一种高精度DSM反演方法。本文以最大化相位差最优化方法估计相干系数为基础，通过归一化体散射相位中心随着消光系数变化趋势的分析，构建了一种电磁波在植被中高散射相位中心和低散射相位中心随消光系数变化的指数模型，由该模型得到植被中电磁波的消光系数从而获得电磁波在植被中的最浅穿透深度。将得到的电磁波最浅穿透深度补偿到高散射相位中心干涉相位处理得到的高程中可获得最终DSM结果。试验结果表明，本文方法较传统方法能有效提高植被区DSM反演精度。在植被高度变化不大的情况下，由此也可以反演出植被下高精度DTM结果<sup>[17]</sup>，为植被区高精度地形测绘提供了一种可能。

## 参考文献

- [1] ROSEN P A, HENSLEY S, JOUGHIN I R, *et al.* Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Proceedings of IEEE*, 2000, 88(3): 333–382. doi: [10.1109/5.838084](https://doi.org/10.1109/5.838084).
- [2] CLARK M L, CLARK D B, and ROBERTS D A. Small-footprint Lidar estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(1): 68–89. doi: [10.1016/j.rse.2004.02.008](https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.008).
- [3] ANDERSEN H E, REUTEBUCH S E, and MCGAUGHEY R J. *Active Remote Sensing*[M]. Netherlands: Springer, 2006: 43–66. doi: [10.1007/978-1-4020-4387-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4387-1_3).
- [4] GUSTAVO H X, KARLUS A, CAMARA D M, *et al.* The dual-band PolInSAR method for forest parametrization[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 9(7): 3189–3201. doi: [10.1109/JSTARS.2016.2520900](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2520900).
- [5] GONZÁLEZ C, BRÄUTIGAM B, RIZZOLI P, *et al.* Relative height accuracy analysis of Tandem-X DEM products[C]. The 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Hamburg, Germany, 2016: 1172–1176.
- [6] YASER S, BENOÏT S, BRIGITTE L, *et al.* Canopy Height Model (CHM) derived from a TanDEM-X InSAR DSM and an airborne lidar DTM in boreal forest[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(1): 381–397. doi: [10.1109/JSTARS.2015.2512230](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2512230).
- [7] 周伟, 陈尔学, 刘国林, 等. 基于ALOS极化干涉SAR数据的DEM提取方法研究[J]. *遥感技术与应用*, 2013, 28(1): 44–51. doi: [10.11873/j.issn.1004-0323.2013.1.44](https://doi.org/10.11873/j.issn.1004-0323.2013.1.44).  
ZHOU Wei, CHEN Erxue, LIU Guolin, *et al.* Extract DEM from ALOS based on polarimetric SAR Interferometry[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(1): 44–51. doi: [10.11873/j.issn.1004-0323.2013.1.44](https://doi.org/10.11873/j.issn.1004-0323.2013.1.44).
- [8] 龙江平, 刘峰, 段祝庚. 联合干涉相位和相干性幅度的极化干涉SAR最优相干性估计[J]. *测绘学报*, 2017, 46(1): 73–82. doi: [10.11947/j.AGCS.2017.20150509](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2017.20150509).  
LONG Jiangping, LIU Feng, and DUAN Zhugeng. A new method of coherence optimization based on the phase and coherence magnitude in polarimetric SAR interferometry[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(1): 73–82. doi: [10.11947/j.AGCS.2017.20150509](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2017.20150509).
- [9] KUGLER F, LEE S K, HAJNSEK I, *et al.* Forest height estimation by means of Pol-InSAR data inversion: The role of the vertical wavenumber[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(10): 5294–5311. doi: [10.1109/TGRS.2015.2420996](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2420996).
- [10] CLOUDE S R. *Polarization Application in Remote Sensing*[M]. Oxford: Oxford University Press, 2009: 265–274.
- [11] 卢红喜, 宋文青, 李飞, 等. 基于幅相一致性校正的稳健植被参

- 数反演方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(2): 283–290. doi: [10.11999/JEIT140261](https://doi.org/10.11999/JEIT140261).
- LU Hongxi, SONG Wenqing, LI Fei, *et al.* Forest parameters inversion based on nonstationarity compensation and mapping space regularization[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(2): 283–290. doi: [10.11999/JEIT140261](https://doi.org/10.11999/JEIT140261).
- [12] 孙宁霄, 吴琼之, 孙林. 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[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(5): 1051–1057. doi: [10.11999/JEIT160774](https://doi.org/10.11999/JEIT160774).
- SUN Ningxiao, WU Qiongzhi, and SUN Lin. Topography and tree height estimation based on the best normal matrix approximation for polinsar coherence region[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(5): 1051–1057. doi: [10.11999/JEIT160774](https://doi.org/10.11999/JEIT160774).
- [13] FRANCK G and THUY L T. Forest modeling for height inversion using single-baseline InSAR/Pol-InSAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1528–1539. doi: [10.1109/TGRS.2009.2032538](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2032538).
- [14] LAGARIAS J C, REEDS J A, WRIGHT M H, *et al.* Convergence properties of the nelder-mead simplex method in low dimensions[J]. *SIAM Journal of Optimization*, 1998, 9(1): 112–147. doi: [10.1137/S1052623496303470](https://doi.org/10.1137/S1052623496303470).
- [15] BANDA F and TEBALDINI S. Texture-free absolute DEM retrieval from opposite-side multibaseline InSAR data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(1): 43–47. doi: [10.1109/LGRS.2015.2494684](https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2494684).
- [16] CHOI C and KIM D J. Optimum baseline of a single-pass InSAR system to generate the best DEM in tidal flats[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2018, 11(3): 919–929. doi: [10.1109/JSTARS.2018.2795107](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2795107).
- [17] BRYAN M, ZHANG Q P, MARCUS S, *et al.* Extraction of DTM beneath forest canopy using a combination of X-Band InSAR and L-band PolInSAR data[C]. European Conference on Synthetic Aperture Radar, Aachen, Germany, 2010: 821–824.
- 解金卫: 男, 1990年生, 博士生, 研究方向为极化/干涉合成孔径雷达信号处理与信息提取技术.
- 索志勇: 男, 1979年生, 副教授, 主要研究方向为干涉/极化合成孔径雷达信号处理.
- 李真芳: 男, 1977年生, 教授, 主要研究方向为干涉/极化合成孔径雷达信号处理与系统设计.
- 王跃锷: 男, 1992年生, 博士生, 研究方向为干涉合成孔径雷达信号处理与系统设计.