

引用格式: 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):-. [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):-.]

# 基于 ALOS 极化干涉 SAR 数据的 DEM 提取方法研究

周 伟<sup>1,2,3</sup>, 陈尔学<sup>1,3</sup>, 刘国林<sup>2</sup>, 李文梅<sup>1,3</sup>, 冯 琦<sup>1,3</sup>

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091;

2. 山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266510;

3. 国家林业局遥感与信息技术重点开放性实验室, 北京 100091)

**摘要:**极化干涉理论的发展以及全极化卫星的发射, 为极化干涉的研究应用提供了广阔的发展空间, 开展极化干涉 SAR 提取 DEM 的研究对于解决单极化干涉 SAR 在植被覆盖区 DEM 提取精度较低的问题具有重要意义。基于山东泰安地区的一对 ALOS PALSAR 全极化干涉数据, 利用相干性最优方法和最大化相位中心分离的方法获取极化干涉信息, 并通过对优化后干涉信息的滤波、解缠、基线精确估计等处理来提取 DEM, 最后将相干优化的结果与传统 HH、HV、VV 单极化干涉结果进行对比分析。结果表明: 优化方法较单极化干涉方法可以有效降低干涉图的噪声, 减少相位解缠的残差点, 提高解缠相位的质量, 并且不同优化方法之间还存在一定差异, 数值半径方法获取的 DEM 精度要好于其他两种优化方法; 通过等值线-Goldstein 二级干涉 SAR 滤波方法可进一步提高单极化和优化干涉图的质量, 降低残差点, 提高相位质量, 在水体覆盖的区域通过滤波窗口的设置可以很好地改善 DEM 的精度。

**关 键 词:**干涉; 极化干涉; 相干优化; DEM; ALOS PALSAR

**中图分类号:** TP 79      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-0323(2013)01-0-08

## 1 引 言

极化干涉 SAR 是一种将极化多通道信息和干涉信息结合起来的新型遥感技术, 吴一戎等<sup>[1]</sup>总结了该技术在地表植被参数反演、DEM 提取、地物分类和区域变化检测等方面的应用前景。相干优化方法主要通过矢量干涉和优化方法将极化多通道信息融合到干涉信息中, 如 Cloude 和 Papathanassiou<sup>[2-4]</sup>提出的奇异值分解 SVD(Singular value decomposition)算法, Tabb 等<sup>[5]</sup>提出的相位中心分离 PD(Phase diversity)算法, Colin 等<sup>[6]</sup>提出的数值半径 NR(Numerical Radius)算法。同时, 有些学者也

开展了将这些优化方法用于植被覆盖区 DEM 提取的研究。李新武等<sup>[7-8]</sup>基于 SIR-C L 波段极化干涉 SAR 数据, 利用奇异值分解的优化方法进行 DEM 提取, 发现优化方法提取的 DEM 精度要好于传统 HH 极化通道, 尤其在植被覆盖区, DEM 精度约有 10 m 的提高; 熊涛等<sup>[9]</sup>利用极化信息和干涉信息融合的方法提取 DEM, 发现融合后的相位质量提高了 7%, 相位解缠的残差点也减少了 95% 以上。

以上研究都是基于短时间基线(1 天或十几分钟)极化干涉 SAR 数据(航天飞机 SAR 重轨干涉或机载 SAR 重轨干涉)开展的, 而长重访周期星载极化 SAR(如 ALOS PALSAR、Radarsat-2)用于干涉

收稿日期: 2012-01-06; 修订日期: 2012-10-11

基金项目: 中欧科技合作“龙计划”二期(5344), 自然科学基金课题“多维度微波成像的陆地遥感应用研究”(60890074), 973 课题“主动遥感散射机理与植被三维结构参数反演”(2007CB714404)。

作者简介: 周 伟(1984—), 男, 江苏盱眙人, 硕士研究生, 主要从事干涉 SAR 和极化干涉 SAR 等方面的研究。

E-mail: zwm0401@163.com。

通讯作者: 陈尔学(1969—) 男, 山东成武人, 研究员, 主要从事 SAR 定量参数反演研究。E-mail: chenrx@caf.ac.cn。

测量时,由于受时间去相干的影响,干涉相干性大大降低,特别是在植被覆盖区,这时利用常规的单极化干涉测量方法提取 DEM 的精度必然会受到更大的影响。在这种情况下,极化的多样性是否仍然有利于 DEM 干涉测量精度的提高?新出现的极化干涉优化方法对改善 DEM 提取精度的贡献如何?现有的干涉 SAR 滤波方法是否能够进一步提高极化干涉 SAR 提取 DEM 的精度,不同的干涉 SAR 滤波的效果是否一致?从我们掌握的文献来看,针对这些问题的研究尚未深入开展。

本文基于一对 ALOS PALSAR 全极化干涉数据,通过对优化后干涉信息的滤波、解缠、基线精确估计等处理来提取 DEM,将相干性最优方法和最大化相位中心分离的方法与传统 HH、HV 和 VV 单极化干涉方法进行了 DEM 提取精度量化比较分析和评价。

2 试验区与数据

试验区位于山东省泰安地区,海拔高差约为 1 500 m,地形起伏较大,同时试验区有城市、农村、河流、农田和植被等,非常适合在不同的散射机理下进行 DEM 提取研究。本文主要采用一对时间间隔为 46 d 的 L 波段 ALOS PALSAR 全极化数据,以

2009 年 4 月 2 日和 5 月 18 日的影像分别作为主、辅影像,主影像 4 个角点坐标分别为(36°32′59″N、116°56′13″E)、(36°36′03″N、117°15′14″E)、(35°58′30″N、117°05′02″E)、(36°01′37″N、117°23′56″ E),单视复影像的初始大小为 1 248 列×18 432 行,分辨率为 9.37 m×3.54 m,中心入射角为 23.8°。影像中心的空间基线长度为 191 m,垂直基线为 157 m,实验中原始影像对经过 1 : 5 多视和高精度配准,处理后的影像大小为 1 248 列×3 686 行。

为了验证各种实验方法提取的 DEM 效果与精度,本文采取国家基础地理信息中心获取的 1 : 5 万的 DEM 作为参考,精度满足 1 : 5 万地形图的标准,试验中将参考 DEM 与 SAR 的公共区域投影到与 SAR 相同分辨率的斜距系统下进行分析。

3 基于极化干涉 SAR 的 DEM 提取方法

传统单极化通道 InSAR(Interferometry SAR)和多极化通道的 PoLInSAR 提取 DEM 的主要不同点在于如何获取干涉信息,前者直接利用复数据相干处理的干涉信息提取 DEM,而后者利用矢量干涉及其相干优化获取 PoLInSAR 数据的干涉信息进行 DEM 的提取。本文基于目前已有研究建立了 DEM 提取方法比较评价流程,如图 1 所示。

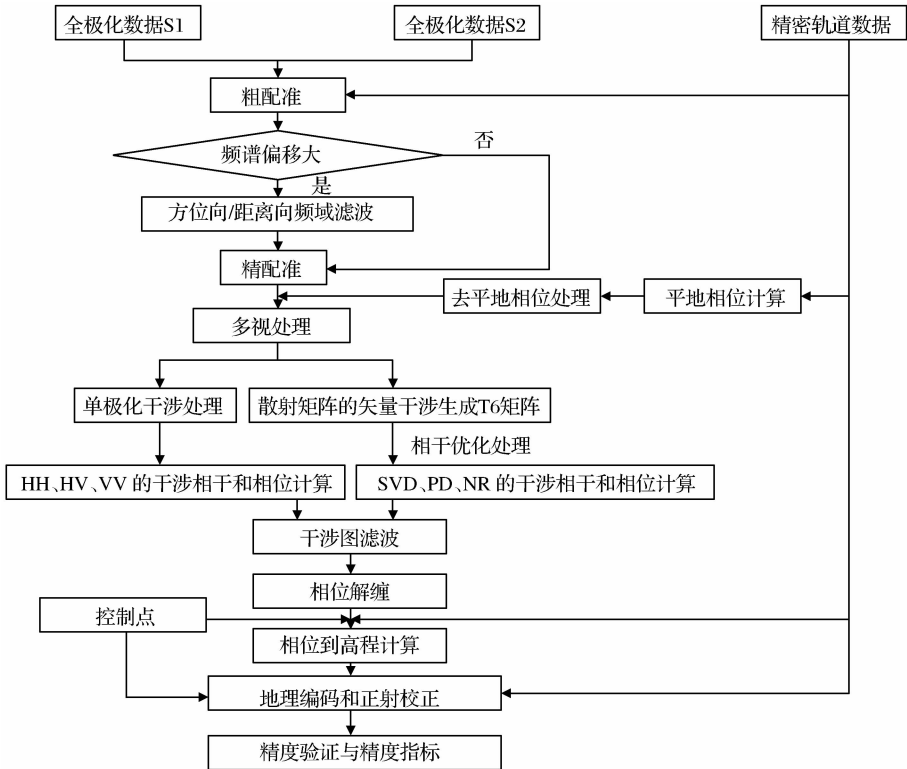


图 1 InSAR 和 PoLInSAR 生成 DEM 的数据处理流程

Fig. 1 Processing flow for DEM generation using InSAR and PoLInSAR data

### 3.1 散射矩阵的矢量干涉

将两次飞行的散射矩阵经过 Pauli 基变换,得到散射矢量  $k_1$  和  $k_2$ ,将  $k_1$  和  $k_2$  组成的 6 维复矢量做外积运算,生成一个半正定的 Hermitian 矩阵  $T_6^{[2]}$ ,公式如下:

$$[T_6] = \langle \begin{pmatrix} K_1 \\ k_2 \end{pmatrix} (k_1^H \quad k_2^H) \rangle = \begin{bmatrix} [T_{11}] & [\Omega_{12}] \\ [\Omega_{12}]^H & [T_{22}] \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:上标  $H$  表示复共轭转置:

$$k_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{hh1} + S_{vv1}, S_{hh1} - S_{vv1}, 2S_{hv1}]^T$$

$$k_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{hh2} + S_{vv2}, S_{hh2} - S_{vv2}, 2S_{hv2}]^T$$

$$[T_{11}] = \langle k_1 k_1^H \rangle, [T_{22}] = \langle k_2 k_2^H \rangle, [\Omega_{12}] = \langle k_1 k_2^H \rangle \quad (2)$$

$[T_{11}]$ 、 $[T_{22}]$  是两极化数据的相干矩阵;  $[\Omega_{12}]$  是新生成的矩阵,包含了两个轨道数据的极化信息和全极化数据间的干涉信息。在投影矢量  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  变换下,干涉复相干和相位的表达式分别如下:

$$\gamma(\omega_1, \omega_2) = \frac{\langle \omega_1^H [\Omega_{12} \omega_2] \rangle}{\sqrt{\langle \omega_1^H [T_{11} \omega_1] \rangle \langle \omega_2^H [T_{22} \omega_2] \rangle}} \quad (3)$$

其中:

$$\phi = \arg\{(\omega_1^H k_1)(\omega_2^H k_2)^H\} = \arg\{\omega_1^H [\Omega_{12} \omega_2]\} \quad (4)$$

arg 为复数的辐角。

### 3.2 极化干涉优化方法

#### 3.2.1 SVD 方法

Cloude 等<sup>[2-4]</sup>对 SVD 方法进行了详细说明。具体是式(3)可以得到一个使复相干系数最优的思路:令分母保持不变,使分子最大化。该方法主要通过构造复拉格朗日函数使相干性最优,具体表达式如下:

$$L_s = \omega_1^H [\Omega_{12}] \omega_2 + \lambda_1 (\omega_1^H [T_{11}] \omega_1 - C_1) + \lambda_2 (\omega_2^H [T_{22}] \omega_2 - C_2) \quad (5)$$

其中: $C_1$ 、 $C_2$  为常数。使  $L_s$  对 4 个变量  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\omega_1^H$ 、 $\omega_2^H$  的偏导为 0,通过计算可以得到式(3)的分母为一常数,同时可以得到下面这组求解特征值与特征向量的方程:

$$[T_{22}]^{-1} [\Omega_{12}]^H [T_{11}]^{-1} [\Omega_{12}] \omega_2 = \lambda_1 \lambda_2^* \omega_2 \quad (6)$$

$$[T_{11}]^{-1} [\Omega_{12}] [T_{22}]^{-1} [\Omega_{12}]^H \omega_1 = \lambda_1 \lambda_2^* \omega_1 \quad (7)$$

此时相干性最优问题就转化为利用 SVD 分解方法求解最大特征值与特征向量的问题,通过分解可以得到 3 组特征值和特征向量,每个特征值可以得到复空间情形下的两个特征向量  $\omega_{i1SVD}$  和  $\omega_{i2SVD}$ ,  $i = 1, 2, 3$ 。为了避免  $\arg\{\omega_{i1SVD}^H \omega_{i2SVD}\} \neq 0$  时两次数据获取引起的相位偏差,还需要对特征向量进行约束求解,即  $\arg\{\omega_{i1SVD}^H \omega_{i2SVD}\} = 0$ 。特征值由大到

小依次对应的特征向量通过式(3)、(4)可以分别得到 SVD1、SVD2 和 SVD3 的干涉信息。

#### 3.2.2 NR 方法

NR 方法<sup>[6]</sup>要求投影矢量  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  必须相同,令  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ ,并且将平均子矩阵  $T = \frac{[T_{11}] + [T_{22}]}{2}$  替换  $[T_{11}]$ 、 $[T_{22}]$ ,该方法等效于求解  $\Pi = T^{-1/2} [\Omega_{12}] T^{-1/2}$  的数值半径问题,方法如下:

(1) 定义矩阵  $\Pi$  的数值范围  $F(\Pi) = \{x^H \Pi x\}, x \in C^3$  且  $x^H x = 1$ ,数值半径  $r(\Pi) = \max\{|F(\Pi)|\}$ 。

(2) 为了将  $[\Omega_{12}]$  的局部最优扩展到全局最优,引入  $e^{j\theta_k}$ ,并选择不同的初始角度  $\theta_{10}$ 、 $\theta_{20}$ 、 $\theta_{30}$  代入矩阵  $H_{\theta_k} = (\Pi e^{j\theta_k} + \Pi^H e^{-j\theta_k})/2$ ,  $\theta_k = \theta_{10}$ 、 $\theta_{20}$ 、 $\theta_{30}$ ,计算  $H_{\theta_k}$  最大的特征值  $\lambda_{\max k}$  和对应的特征向量  $x_k$ ,  $\dagger$  为广义逆矩阵。

(3) 定义  $\theta_k' = \arg\{x_k^H H_{\theta_k} x_k\}$ ,如果  $|\theta_k - \theta_k'| < \epsilon$ ,  $\epsilon$  是一个微小的常数,那么特征向量  $x_k$  就是最优的,否则令  $\theta_{k+1} = -\theta_k'$  代入步骤(2)、(3)重复迭代,直到找到满足条件的 3 组特征向量。

由该方法可以看出,3 个初始的迭代角度可以得到 3 个特征向量,通过式(3)、(4)可以分别得到 NR1、NR2 和 NR3 的干涉信息。

#### 3.2.3 PD 方法

PD 算法<sup>[5]</sup>通过最大化余切函数获得优化的特征值与特征向量。余切函数形式如下:

$$\cot(\gamma) = \frac{\text{Re}\{\gamma\}}{\text{Im}\{\gamma\}} = \frac{\omega^\dagger ([\Omega_{12}] + [\Omega_{12}]^\dagger) \omega}{\omega^\dagger (-i[\Omega_{12}] - [\Omega_{12}]^\dagger) \omega} \quad (8)$$

具体算法如下:

(1) 将  $[\Omega_{12}]$  做一个相位旋转变换,可以得到:

$$[\tilde{\Omega}_{12}] = [\Omega_{12}] e^{j\varphi}, \varphi = \frac{\pi}{2} - \angle \text{tr}([\Omega_{12}])$$

(2) 计算矩阵

$$([\Omega_{12}] + [\Omega_{12}]^\dagger), -i([\Omega_{12}] - [\Omega_{12}]^\dagger)$$

(3) 求解

$$([\Omega_{12}] + [\Omega_{12}]^\dagger) \omega = -i \lambda ([\Omega_{12}] - [\Omega_{12}]^\dagger) \omega$$

的特征值和特征向量。

(4) 利用特征向量和公式(3)、(4)可以得到 PDHigh 和 PDLow 的干涉信息。

### 3.3 PoLInSAR 提取 DEM 流程

由图 1 可以看出,应用 PoLInSAR 数据提取 DEM 的流程可以分为配准,极化干涉相干优化,生

成干涉图、滤波、解缠、DEM 生成等步骤,与传统 InSAR 处理流程相比多了一步相干优化,相干优化的目的是提取更精确的相位信息。

与传统应用 InSAR 数据提取 DEM 不同的是,利用 PoLInSAR 数据不仅可以利用干涉信息对位置的敏感性,而且还可以借助于目标的极化信息,而极化信息能够反映目标的物理散射机制,减少一个分辨单位内有效散射中心高度差引起的相位偏差,特别是植被覆盖的区域,并提高干涉的相干性,从而获取更加准确的地表相位信息。为了与单极化干涉

处理的结果进行比较,还对 HH、HV、VV 分别进行了提取 DEM 的干涉试验。

4 结果与分析

4.1 极化干涉相干优化对干涉相干性的影响

在实际的相干系数估计中,通常采用窗口估计的方法计算两幅 SAR 图像的相干系数,滤波以后的干涉图因为只有一景影像,无法计算其相干性,为了评价其滤波质量,利用伪相干系数来评价<sup>[10]</sup>,如表 1 所示。

表 1 干涉 SAR 和极化干涉 SAR 相干优化的相干系数统计表  
Table 1 Coherence coefficients of InSAR and PoLInSAR coherence optimization

名称		HH	HV	VV	SVD1	SVD2	SVD3	NR1	NR2	NR3	PDHigh	PDLow
滤波前 相干系数	最小值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	最大值	0.993	0.985	0.99	0.98	0.952	0.919	0.977	0.974	0.977	0.915	0.947
	均值	0.437	0.288	0.429	0.472	0.305	0.154	0.454	0.451	0.453	0.225	0.257
	标准差	0.167	0.144	0.165	0.132	0.114	0.093	0.139	0.140	0.139	0.113	0.125
Goldstein 滤波后 伪相干系数	最小值	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	最大值	0.997	0.994	0.997	0.993	0.997	0.997	0.994	0.994	0.994	0.996	0.995
	均值	0.734	0.483	0.723	0.893	0.883	0.832	0.899	0.898	0.899	0.878	0.890
	标准差	0.197	0.244	0.199	0.118	0.128	0.173	0.112	0.115	0.112	0.123	0.116

由表 1 可以看出:①长时间基线和噪声等造成的失相干,导致相干性都明显偏低,如单极化通道干涉中最优的相干系数均值为 0.437,而相干优化后的最大相干系数均值也只有 0.472;②单极化通道 InSAR 统计的相干性,因 HV 为体散射占优,且植被对相干性影响较大,HH 和 VV 的相干系数均值较 HV 要高,这 3 种相干系数均值大小依次为 0.437、0.429 和 0.288;③基于相干性最优的 SVD 和 NR 方法去除了部分散射相位中心与地表相位的偏差并分离出了部分噪声,相干性较 InSAR 要高,如 SVD1 和 NR1 的相干性均值较 HH 极化干涉分别提高了 0.035 和 0.017;④PD 方法只保证了相位中心的最大化分离,没有考虑相干性优化,相干性偏低,但是由于相位分离后残留的不连续点大量减少,使得散射相位中心更加连续,从而使滤波变得更加容易,并且滤波后的效果较滤波前明显提升,如滤波前 PDLow 的相干系数均值为 0.257,但是 Goldstein 滤波后伪相干系数均值提高到 0.89,提升效果明显好于单极化通道干涉 SAR 方法。

4.2 极化干涉相干优化对相位解缠的影响

本文采用相对比较成熟的最小成本流 MCF (Minimum Cost network Flow) 算法进行相位解

缠,因解缠的图像(1 248 列×3 686 行)较大,导致在 CPU 为 3.20 GHz、内存为 1 G 的电脑上无法整景解缠,为了解决这个问题,在实际处理时将干涉图分成 3 块进行串行处理。

通过对滤波前的干涉图进行相位解缠,发现 HH、HV 和 VV 极化通道的残差点数量分别为 956 005、1 546 531 和 983 715;SVD1、NR1 和 PDLow 残差点数量分别为 38 980、52 843 和 109 762,即通过矢量干涉和相干优化可以有效抑制噪声,并且可以减少残差点的数量,残差点数量较 HH 干涉分别减少了 96%、94% 和 88%。

因为优化后的干涉图仍残留了部分噪声,所以进一步采用了干涉 SAR 滤波方法进行处理。目前干涉 SAR 比较经典的滤波方法且得到大量应用的算法主要有基于频率域的 Goldstein 自适应滤波及其改进算法<sup>[11-13]</sup>,基于空间域的 LEE 滤波算法和等值线滤波算法<sup>[14-17]</sup>,然而这些滤波算法在单一使用时都会残留一部分噪声,李佳等<sup>[18]</sup>利用了等值线-Goldstein 二级滤波方案,发现该方案可以较好地改进干涉图质量,本文利用 Goldstein 滤波和等值线-Goldstein 二级滤波方法分别对干涉图进行滤波,发现利用 Goldstein 滤波后(窗口大小为 16×16)解缠

的残差点进一步减少, SVD1、NR1、PDLow、HH、HV 和 VV 的残差点数量分别为 12 211、8 449、10 364、233 206、866 108 和 249 062,等值线-Goldstein 二级滤波方法(窗口大小分别为  $5\times3$  和  $8\times8$ ) 在噪声抑制方面要好于 Goldstein 滤波方法, HH 和 NR1 的残差点分别为 5 395 和 3 416。

4.3 DEM 提取精度分析与评价

为了校正 SAR 获取的 DEM 与参考 DEM 之间的系统误差, 本文采用均匀分布的控制点对基线进行改正, 并利用改进后的卫星参数对高程进行反演。

4.3.1 单极化和相干优化的精度分析

图 2 给出了利用 Goldstein 滤波后的解缠相位, 在相同的分辨率和 SAR 斜距系统下 HH、HV、VV、SVD1、NR1、PDLow 干涉方法和优化方法获取的 DEM 和参考 DEM 的显示效果。由图 2 可以看出, 参考 DEM 与实验获取的 DEM 具有公共区域(也有一小部分区域未能覆盖 SAR 影像), 这部分公共区域作为以下精度分析的区域, 同时相干优化后的整体效果要好, 单极化因存在过多的不连续点而显得模糊(图 2(a)~(c)), 而优化的 DEM 显得比较清晰(图 2(d)~(f))。

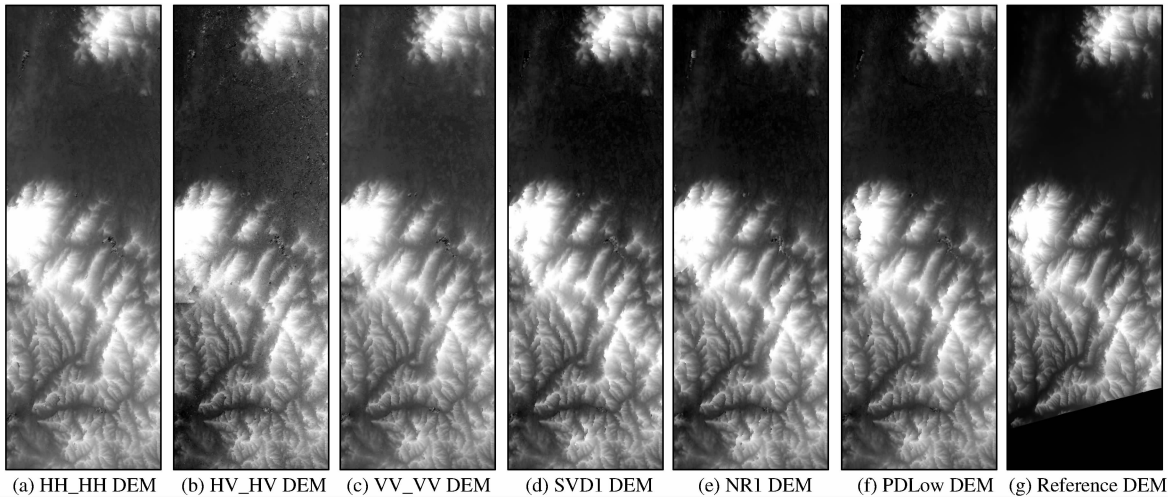


图 2 不同类型的 DEM 投影到相同分辨率与斜距系统下的显示结果

Fig. 2 DEM extracted by different methods projected in same resolution and slant range coordinate

图 3 给出了图 2 所示的 InSAR 和 PoLinSAR 相干优化方法所获取的 DEM 与参考 DEM 之间的

误差统计直方图, 表 2 给出了图 2 所示的 DEM 在参考 DEM 的标准下, 分别满足 5、10、16、30、50 m

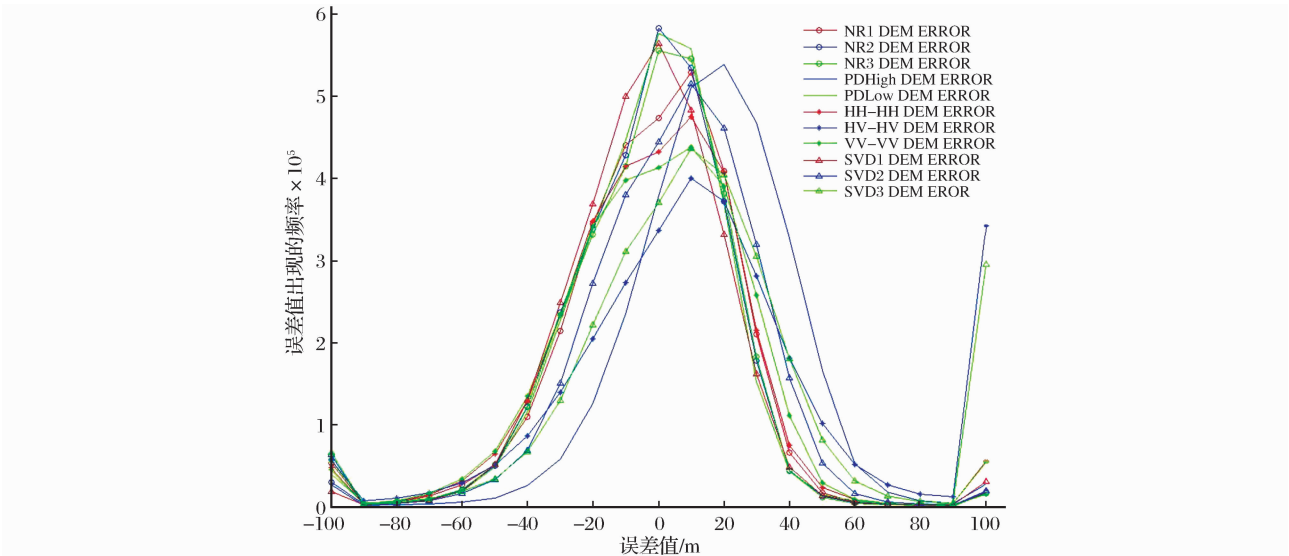


图 3 干涉和极化干涉相干优化获取的 DEM 与参考 DEM 的误差统计直方图

Fig. 3 Error histogram of DEM extracted from InSAR and PoLinSAR coherence optimization with reference DEM

表 2 干涉和极化干涉相干优化获取 DEM 的精度统计

Table 2 Accuracy of DEM extracted from InSAR and PoLInSAR coherence optimization

名称	以参考 DEM 为标准,满足精度要求的概率统计/%				
	≤5 m	≤10 m	≤16 m	≤30 m	≤50 m
HH-HH	21.1	35.3	53.6	76.4	97.1
HV-HV	18.0	21.3	34.6	66.7	82.4
VV-VV	20.5	34.2	51.8	74.8	90.4
SVD1	25.4	42.3	60.6	89.5	98.7
SVD2	21.1	34.7	52.2	75.5	96.7
SVD3	18.6	30.3	43.6	70.2	83.3
NR1	22.5	39.4	57.6	88.0	97.9
NR2	26.2	43.1	61.5	90.0	99.1
NR3	24.3	41.7	59.3	89.1	98.3
PDHigh	23.4	41.5	58.9	88.3	98.1
PDLow	25.3	41.9	60.2	89.8	98.8

精度的概率。

由图 3 可以看出,相干优化方法中 NR2、PD-Low、SVD1 和 NR3 的 DEM 误差峰值接近于 0, NR1、SVD2、HH-HH、VV-VV、SVD3 和 HV-HV 的 DEM 误差峰值大约在 10 m 处,PDHigh 的 DEM 误差峰值在 20 m 附近,且各种 DEM 误差在 0 处出现的频率由大到小依次为 NR2、PDLow、SVD1、NR3、NR1、SVD2、HH-HH、VV-VV、PDHigh、SVD3 和 HV-HV。从图 3 可以初步得出,相干优化方法的 DEM 精度绝大部分要好于单极化干涉方法,且 DEM 精度最优的 3 种结果从优到劣分别为 NR 方法中的 NR2,PD 方法中的 PDLow 和 SVD 方法中的 SVD1,并通过对均方根误差的计算,发现 NR2、PDLow、SVD1 的均方根误差分别较 HH 通道的均方根误差降低了 16.6、15.3 和 14.3 m, NR2 的均方根误差较 HH 通道提高了 44%。

由表 2 可以看出,同时满足 5、10、16、30、50m 精度的概率,也是相干优化方法要好于单极化通道干涉方法, NR2 满足各个精度范围的概率最大,PD-Low 和 SVD1 的概率统计比较接近。由前面相干性和解缠统计的结果可以知道, PDLow 滤波前的相干性偏低,但是不连续点和解缠的残差点相对较少,此时利用解缠的相位反演得到的 DEM 精度相对较高,可以看出相位的连续性也是影响 DEM 精度的重要因素。

另外,本实验采用的 NR 方法需要的迭代时间相对较长,运算效率要低于其它两种优化方法。同时本文获取的 DEM 精度在相位的不连续点、水体覆盖以及阴影与叠掩区域仍存在较大的误差,在这

些区域优化方法所提取的 DEM 精度仍较低,对这些区域掩膜后,DEM 的总体精度有较大的提高。目前,在阴影与叠掩区域主要采用多基线或多入射角的方法进行解决,还没有针对这些特殊区域利用两次飞行的干涉 SAR 数据进行 DEM 高精度提取的有效方法,但是我们发现如果利用大窗口进行滤波,可以解决小面积水体覆盖所引入的误差,但是会在其它区域引入平滑误差,下面主要分析二级滤波方法在改善 DEM 中的应用。

4.3.2 二级滤波方法的精度分析

通过上述试验结果可知,NR 方法获取的 DEM 精度最高,同时在试验中干涉信息还存在一些影响 DEM 精度的残差点,以下的试验分析中主要采用 HH 和 NR 方法获取的干涉信息进行二级滤波的试验验证分析。首先分别在小窗口的前提下进行滤波处理,等值线滤波窗口大小为 5×3,Goldstein 滤波窗口大小为 8×8,通过 DEM 的提取与精度验证,得到 HH 和 NR2 的 DEM 精度较之前只进行一次 Goldstein 滤波方法,均方根误差分别降低 7.2 m 和 3.3 m。然后利用 9×7 和 64×64 的大窗口进行滤波,HH 和 NR2 得到的 DEM 整体精度有所下降,但是在水体覆盖的区域 DEM 精度却得到了提高,因此将这部分水体覆盖区改善的 DEM 对小窗口滤波得到的 DEM 进行替换,从而得到精度相对比较高的 DEM,HH 和 NR2 的均方根误差较之前的结果又降低了约 2 m。可见二级滤波比单独使用一次滤波在强噪声 DEM 精度改进中具有更好的实际应用价值,对改善一次滤波不能有效去除残差点的缺点具有很好的弥补作用。

## 5 结 语

本文开展了将极化干涉 SAR 相干优化方法用于 DEM 提取的技术研究,得到如下结论:

(1) PoLInSAR 相干优化方法较单极化 HH InSAR 可以使解缠残差点数量大量减少且 DEM 均方根误差精度可以提高 44%,也就是说 PoLInSAR 相干优化方法在获取 DEM 时精度高于传统的单极化通道 InSAR 方法。

(2) 几种优化方法都提高了 DEM 精度,但是还存在一些差别,本实验中 NR2 获取的 DEM 最优,同时 PDLow 获取的 DEM 精度要好于 SVD 方法,在实际提取 DEM 的数据处理中,采取 NR 方法是最优的。

(3) 基于相位分离的 PD 算法在顾及相位中心最大化分离的前提下,得到了较高精度的 DEM。虽然滤波前相干性明显偏低,但是相位的不连续点和解缠的残差点较单极化干涉明显减少,可以看出相干性不只是获取 DEM 的唯一影响因素,还需要考虑散射相位中心的连续性。

(4) 采用大窗口二级滤波的方法可以有效改善小面积水体覆盖区域的 DEM 精度,但是地形起伏较大的区域会受到平滑的影响,所以综合利用大窗口滤波提取的 DEM 对小窗口滤波的水体覆盖区 DEM 进行替换来改善最终 DEM 的精度。

在地形坡度较大的区域,如徂徕山和泰山因存在大量的叠掩与阴影,提取的 DEM 精度受到很大的影响,下一步研究中将考虑利用多基线、多入射角等方法来解决该问题。

**致谢:** 本文所用 ALOS PALSAR 数据通过“龙计划”第 3 方卫星数据申请渠道自 JAXA 免费获取得到,是“龙计划”极化干涉 SAR 专题产出之一。

## 参考文献(References):

- [1] Wu Yirong, Hong Wen, Wang Yanping. The Current Status and Implications of Polarimetric SAR Interferometry [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29 (5):1258-1262. [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.]
- [2] Cloude S R, Papathanassiou K P. Polarimetric SAR Interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5):1551-1565.
- [3] Cloude S R, Papathanassiou K P. Three-stage Inversion Process for Polarimetric SAR Interferometry [J]. IEEE Proceedings Radar Sonar & Navigation, 2003, 150(3):125-134.
- [4] Papathanassiou K P, Cloude S R. Single-baseline Polarimetric SAR Interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11):2352-2363.
- [5] Tabb M, Orrey J, Flynn T, et al. Phase Diversity: A Decomposition for Vegetation Parameter Estimation Using Polarimetric SAR Interferometry [C]//Proceedings of 4th European Synthetic Aperture Radar Conference, 2002:721-724.
- [6] Colin E, Titin-Schnaider C, Tabbara W. An Interferometric Coherence Optimization Method in Radar Polarimetry for High Resolution Imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(1):167-175.
- [7] Li X W, Guo H D, Wang C L, et al. Generation and Error Analysis of DEM Using Spaceborne Polarimetric SAR Interferometry Data [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'02), Toronto, Canada, 2002, 5:2705-2707.
- [8] Li Xinwu. Information Extraction Methods and Application Study of Polarimetric SAR Interferometry [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2002. [李新武. 极化干涉 SAR 信息提取方法及其应用研究 [D]. 北京:中国科学院遥感应用研究所, 2002.]
- [9] Xiong Tao, Yang Jian, Peng Yingning. Approach to Reversion of DEM based on Polarimetric SAR Interferometry [J]. Journal Tsinghua University (Science & Technology), 2007, 47 (7):1170-1173. [熊涛, 杨健, 彭应宁. 基于极化 SAR 干涉反演 DEM 的方法 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47 (7):1170-1173.]
- [10] Ghiglia D C, Pritt M D. Two-dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software [M]. New York: John Wiley and Sons, 1998.
- [11] Goldstein R M, Werner C L. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications [J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(21):4035-4038.
- [12] Li Z W, Ding X L, Huang C, et al. Improved Filtering Parameter Determination for the Goldstein Radar Interferogram Filter [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2008, 63(6):621-634.
- [13] Baran L, Stewart M P, Kampes B M, et al. A Modification to the Goldstein Radar Interferogram Filter [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(9):2114-2118.
- [14] Lee J S, Papathanassiou K P, Ainsworth T L, et al. A New Technique for Noise Filtering of SAR Interferometric Phase Images [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5):1456-1464.
- [15] Yu Q F, Yang X, Fu S H, et al. An Adaptive Contoured Window Filter for Interferometric Synthetic Aperture Radar [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(1):23-26.
- [16] Zhang Jingyi, Lei Bin, Liu Tuanjie. A New Spatial Method of SAR Intensity Image Speckle Reduction [J]. Remote Sensing

Technology and Application,2012,27(4):523-529. [张静怡,雷斌,刘团结. 一种新型的空域 SAR 图像相干斑抑制方法[J]. 遥感技术与应用,2012,27(4):523-529. ]

[17] Yu Qifeng,Fu Sihua. Transaction on ESPI and InSAR Interferometric Image based on Fringe Orientation and Fringe Contoured Line[M]. Beijing:Science Press,2007. [于起峰,伏思华. 基于条纹方向和条纹等值线的 ESPI 与 InSAR 干涉条纹图处理方法[M]. 北京:科学出版社,2007. ]

[18] Li Jia, Li Zhiwei, Ding Xiaoli, *et al.* Filtering Strong Noisy Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferogram with Integrated Contoured Median and Goldstein Two-Step Filter[J]. Journal of Remote Sensing,2011,15(4):750-757. [李佳,李志伟,丁晓利,等. 强噪声 SAR 干涉图的等值线-Goldstein 二级滤波[J]. 遥感学报,2011,15(4):758-765. ]

Extract DEM from Alos based on Polarimetric Sar interferometry

Zhou Wei<sup>1,2,3</sup>,Chen Erxue<sup>1,3</sup>,Liu Guolin<sup>2</sup>,Li Wenmei<sup>1,3</sup>,Feng Qi<sup>1,3</sup>  
(1. Institute of Forest Resources Information Techniques,Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091,China;2. Geomatics College,Shandong University of Science and Technology,Qingdao 266510,China;3. State Laboratory of Forest Remote Sensing and Information Techniques,Chinese Academy of Forestry,Beijing 100091,China)

**Abstract:** The development of theory and technology about Polarimetric SAR Interferometry, provided a broad space in research and application, just one of those applications is extract DEM in vegetation coverage area. In this paper, making use of Singular Value Decomposition, Numerical Radius and Phase Diversity ways to extract DEM with processing of filtering, unwrapped phase, base-line estimation and so on. At the end, compared optimization' results with the single polarimetric interferometry such as HH, HV and VV. It has been observed that optimization ways can reduce the interferometric noise and the phase unwrapping residuals, and improve the precision of the DEM. Meanwhile, Numerical Radius way has a better result than Singular Value Decomposition and Phase Diversity ways; Interferogram with integrated Contoured Median and Goldstein two-step filter method can further improve and optimize the quality of the interferogram, reduce residual almost, improve the precision of the DEM, but if two-step filter window setting big will affect the area of non-water-covers while can improve the water-covers area.

**Key words:** Interferometry; Polarimetric interferometry; Coherence Optimization; DEM; ALOS PALSAR