

# DEM 辅助的零中频多基线 InSAR 干涉处理

刘辉<sup>1</sup>, 徐青<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电大学 资源与环境学院, 郑州 450046; 2. 信息工程大学 地理空间信息学院, 郑州 450001)

**摘要:** 借鉴 DEM 辅助的思想, 提出了 DEM 辅助的零中频多基线 InSAR 干涉处理方法. 该方法利用外部粗 DEM 模拟的干涉图与多基线干涉图组中的最低频原始干涉图做差分处理, 得到零中频干涉图; 再对零中频干涉图进行滤波和相位解缠处理后重新加回模拟相位, 构建为原始基准干涉图. 利用该基准干涉图逐步指导较高频干涉图由粗到精地进行相位解缠, 进而高精度地反演 DEM. 充分利用了零中频干涉图的易解性和高频干涉图的高精度性, 解决了高频干涉图频谱混叠、相位欠采样处的解缠难题. 采用邯郸地区 6 景 ENVISAT ASAR 数据进行了干涉处理实验, 实验结果验证了所提方法的有效性.

**关键词:** DEM 辅助; 零中频; 多基线; 合成孔径雷达干涉测量; 差分

**中图分类号:** P237

**文献标志码:** A

传统单基线 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达干涉测量) 只能提供一个干涉相位, 需要经过复杂的相位解缠处理来反演高程信息, 其解缠精度和可靠性较低, 且对大坡度、非连续、叠掩区域等复杂地形的处理能力有限<sup>[1-2]</sup>. 多通道 InSAR 能够提供更多的独立观测通道, 即可以提供多个独立的干涉相位, 从而提高高程估计的精度和稳健性<sup>[3-7]</sup>. 因此, 研究多基线 InSAR 技术对于提高 InSAR 系统高程测量精度及其对复杂地形的适应能力有着重要的理论意义及应用价值.

近年来, 诸多学者研究了多基线 InSAR 的相位解缠技术<sup>[8-12]</sup>, 地表形变监测技术<sup>[13]</sup>, 高程重建方法<sup>[14-17]</sup>等, 但制约反演高程或地表形变精度的关键仍是相位解缠的好坏. 理论上多基线 InSAR 的长短基线配合会使相位展开范围大大扩展, 无须复杂的相位解缠即可直接估计绝对相位, 但实际的数据处理中, 由最低频干涉图解缠结果构成的基准干涉图往往效果很差, 从而导致其指导的较高频干涉图的解缠精度和反演的高程精度也不高.

本文借鉴 DEM (Digital Elevation Model, 数字高程模型) 辅助<sup>[18-20]</sup>的思想, 提出了 DEM 辅助的零中频多基线 InSAR 处理方法. 利用 DEM 辅助解缠最低频干涉图, 进一步指导较高频干涉图由粗到精地进行相位解缠, 进而高精度地反演 DEM. 既能利用零中频干涉图容易解缠的优势, 又能保持高频干涉图的高精度性, 解决了高频干涉图频谱混叠、相位欠采样处的解缠难题.

## 1 DEM 辅助的零中频多基线 InSAR 处理方案

干涉图中相位信息主要包括平地效应引起的相位  $\phi_{\text{flat}}$ 、地形相位  $\phi_{\text{topo}}$ 、形变相位  $\phi_{\text{defo}}$ 、电磁波传输过程中大气波动引起的相位延迟  $\phi_{\text{atmos}}$  以及其他相位噪声  $\phi_{\text{noise}}$ .  $\phi_{\text{flat}}$  表现为与方位向近似平行的密集条纹;  $\phi_{\text{topo}}$  表现为反映地形高度变化的条纹;  $\phi_{\text{defo}}$  表现为反映沿雷达视线方向移动的条纹; 后两种相位更多地呈现为随机性条纹, 少有明显的规律可循. 这 5 种条纹叠加在一起, 使干涉图变得错综复杂, 增加了相位解缠的难度.

DEM 辅助的零中频多基线 InSAR 处理, 将零中频干涉图易解缠优势和多基线级联迭代方法有机结合. 利用外部 DEM 模拟包含  $\phi_{\text{flat}}$  和  $\phi_{\text{topo}}$  的干涉图  $g(\phi_{\text{sim}})$ , 即

收稿日期: 2017-11-24; 修回日期: 2018-01-19.

基金项目: 国家自然科学基金(41071296; 61401509; 41371439); 河南省高等学校重点科研项目(19A420008).

作者简介(通信作者): 刘辉(1986-), 男, 河南郑州人, 华北水利水电大学讲师, 主要研究方向为 InSAR、阵列 SAR.  
E-mail: lh860801@163.com.

$$g(\phi_{sim}) = e^{j(\phi_{flat} + \phi_{topo})}. \tag{1}$$

将  $g(\phi_{sim})$  与忽略随机相位  $\phi_{atmos}$  和  $\phi_{noise}$  的最低频干涉图  $g(\phi_{low})$  求差频,得到零中频干涉图  $g(\phi_{ZIF})$ ,即

$$g(\phi_{ZIF}) = g(\phi_{low})g^*(\phi_{sim}) = e^{j(\phi_{flat} + \phi_{topo} + \phi_{defo})} e^{-j(\phi_{flat} + \phi_{topo})} = e^{j\phi_{defo}}, \tag{2}$$

式中,  $g^*(\phi_{sim})$  为  $g(\phi_{sim})$  的复共轭.

对  $g(\phi_{ZIF})$  进行滤波、解缠处理后,重新加回  $g(\phi_{sim})$ .由于此时的干涉图还包含  $\phi_{flat}$ ,对其做去平地效应处理后构建为原始基准干涉图  $g(\phi_{sta})$ ,即

$$g(\phi_{sta}) = unflatten\{g(\phi_{unwrap}) + g(\phi_{sim})\}, \tag{3}$$

式中,  $g(\phi_{unwrap})$  为零中频干涉图解缠后的相位图,  $unflatten\{\}$  为去平地效应操作.

以  $g(\phi_{sta})$  为初始基准干涉图逐步指导较高频干涉图由粗到精地进行相位解缠,从而高精度地反演 DEM.本文方法的处理流程如图 1 所示,其主要步骤如下.

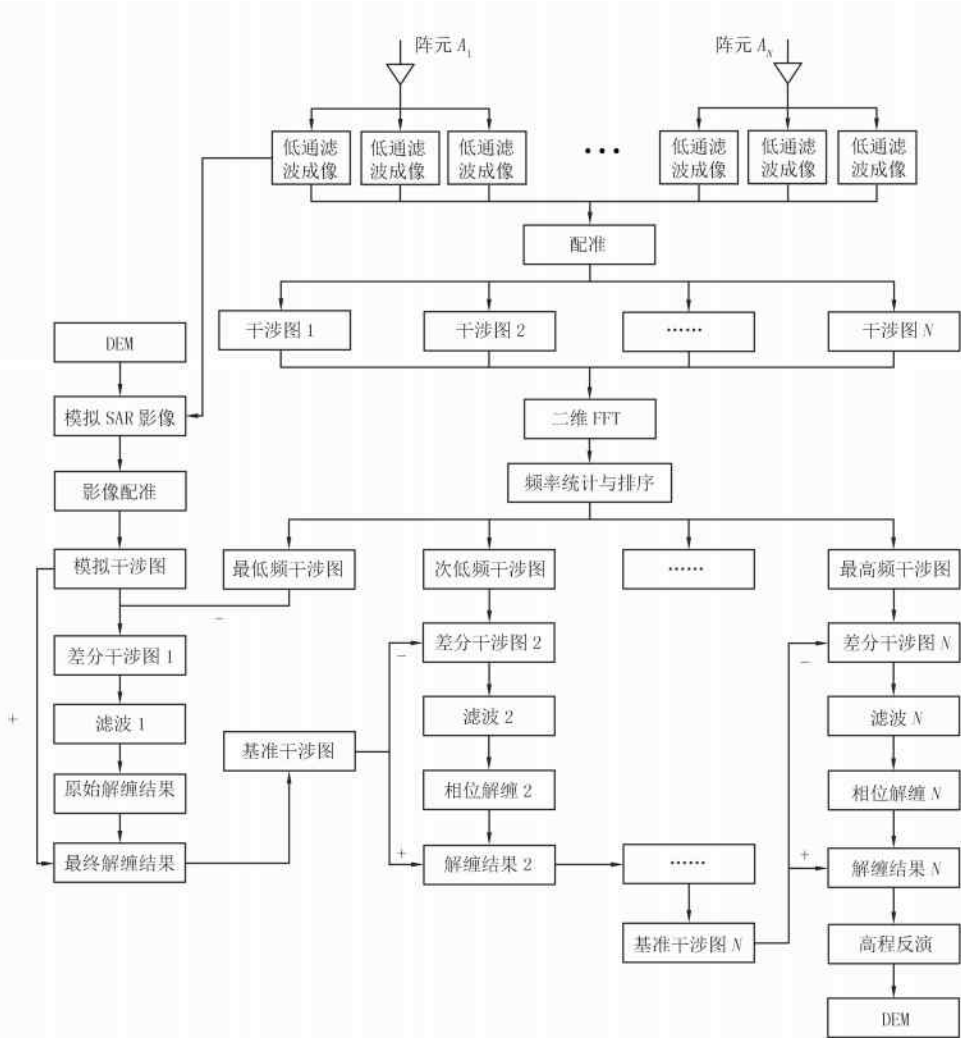


图 1 DEM 辅助的零中频多基线 InSAR 干涉处理

1) 将各幅多基线 InSAR 干涉图利用(4)式转换到二维频率域,并将频谱图像  $F(u, v)$  的零点移至频率矩形中心,通过判断二维频谱峰值位置  $(u_0, v_0)$  与频率矩形中心位置  $(0, 0)$  之间的距离  $S = \sqrt{u_0^2 + v_0^2}$  来统计各幅干涉图的频率大小,并按照从小到大的顺序排列.

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi((ux/M) + (vy/N))}, \tag{4}$$

其中,  $M$  和  $N$  分别表示干涉图的长和宽,  $x$  和  $y$  为时间变量,  $u$  和  $v$  为频率变量,由  $u = 0, 1, 2, \dots, M - 1$  和

$v=0,1,2,\dots,N-1$  定义的矩形区域称为频率矩形,其大小与图像  $f(x,y)$  的大小相同.

2)利用 SRTM DEM 和星历数据仿真 SAR 图像.该过程需要首先利用 RD(Range-Doppler,距离多普勒)构象模型解算像点坐标;然后借助 DEM 和星历数据,利用(5)式求解相应像点的图像强度并赋值.

$$I_{(x,y)} = \sum_{X,Y,Z} \frac{R_0^4 \cos \varphi}{R^4} I_0, \quad (5)$$

其中,  $R_0$  为近距延迟,  $\varphi$  为入射角,  $R$  为某像点对应的斜距,  $I_0$  为近距离处的微波辐射强度,  $I_{(x,y)}$  为像元  $(x,y)$  处的强度值.

3)借鉴光学立体像对中核线一维配准的思想,针对 SAR 图像相同斜距条件下,各像点与其同名像点的斜距差很小的特点,对仿真 SAR 图像和原始 SAR 图像进行方位向一维快速配准;并采用双向匹配策略提高配准的可靠性,建立 DEM 与实际 SAR 图像的一一映射关系.

4)根据上步的映射关系,利用 RD 模型和外部粗 DEM,直接迭代计算真实干涉相位和像点坐标,再对干涉相位进行重采样和  $2\pi$  缠绕,得到规则格网含有平地效应的模拟干涉图.

5)将最低频原始干涉图与模拟干涉图做差分处理,得到零中频干涉图.通常需要利用(6)式对干涉相位做修正处理.

$$\phi_{\text{ZIF}} = \begin{cases} \phi_{\text{low}} - \phi_{\text{sim}} + 2\pi, & (\phi_{\text{low}} - \phi_{\text{sim}}) \leq -\pi, \\ \phi_{\text{low}} - \phi_{\text{sim}}, & -\pi < (\phi_{\text{low}} - \phi_{\text{sim}}) < \pi, \\ \phi_{\text{low}} - \phi_{\text{sim}} - 2\pi, & (\phi_{\text{low}} - \phi_{\text{sim}}) \geq \pi, \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\phi_{\text{ZIF}}$  为零中频干涉图相位;  $\phi_{\text{low}}$  为最低频原始干涉图相位;  $\phi_{\text{sim}}$  为模拟干涉图相位.

6)对零中频干涉图做 Goldstein 滤波和最小费用流相位解缠处理,再将解缠结果和差分时减去的模拟干涉相位重新求和,得到初始解缠结果.该步同样需要修正相位.

7)对初始解缠结果做去除平地效应处理后,将此结果构建为原始基准干涉图.

8)以原始基准干涉图为基础,依次指导较高频干涉图做差分滤波和相位解缠处理,直至最高频干涉图解缠完毕.再根据相位高程转换几何模型进行高程反演,从而获得地形三维信息.

## 2 实验与分析

实验采用河北邯郸地区 2009 年的 6 景 ENVISAT ASAR 数据,选取 2009-01-10 的影像为主影像,剩余影像为辅影像,主辅影像构成的时间基线和空间基线分布如图 2 所示. DEM 数据采用 90 m 格网间距的 SRTM DEM,由 4 幅  $1201 \times 1201$  的 DEM 拼接而成,拼接后覆盖影像区域的 DEM 如图 3 所示.

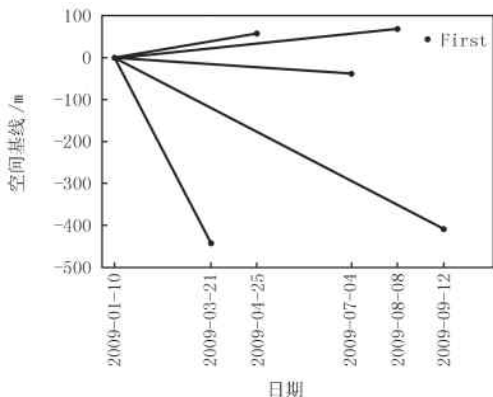


图2 时间基线和空间基线分布示意图

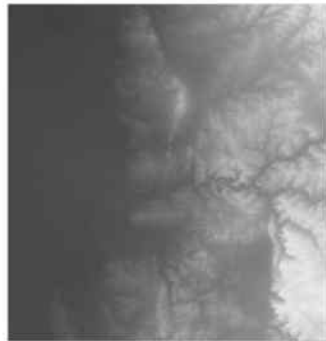


图3 地理坐标系下 DEM

首先对各幅干涉图进行二维 FFT,并将低频分量移至频率矩形中心,可得到各幅干涉图的二维幅值谱,幅值谱中频谱峰值位置与频率矩形中心越近,表明干涉图频率越低.表 1 给出了各干涉图频谱峰值位置的定量统计值,通过距离公式计算可得最低频干涉图为 0110-0704 干涉图,最高频干涉图为 0110-0912 干涉图.因此,从频率最低的 0110-0704 干涉图出发,利用其基线参数和 DEM 模拟解缠后含有平地效应的干涉图,并与

0110-0704 干涉图做差分处理,可得到图 4 所示的零中频干涉图.其二维幅值谱放大 64 倍后如图 5 所示,蓝色十字丝表示频率矩形中心,白色最亮点表示频谱峰值位置,2 个位置重合,即二维中心频率为(0,0).

表 1 干涉图频谱统计值

干涉图类型	频率矩形中心		频谱峰值位置	
	行	列	行	列
0110-0321 干涉图	1 360	1 300	1 308	1 774
0110-0425 干涉图	1 364	1 300	1 291	1 563
0110-0704 干涉图	1 363	1 300	1 324	1 149
0110-0808 干涉图	1 364	1 300	1 381	1 602
0110-0912 干涉图	1 364	1 300	1 470	2 043

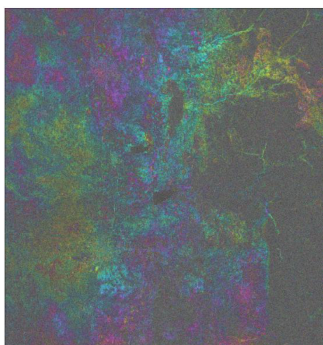


图 4 零中频干涉图

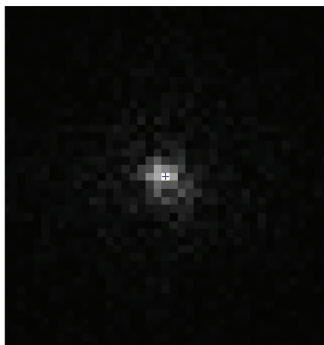


图 5 零中频干涉图幅值谱

对零中频干涉图做滤波和相位解缠处理后,再与差分时减去的模拟干涉相位重新求和,得到图 6 所示的初始解缠结果.再对其进行去平地效应后可得到原始基准干涉图,如图 7 所示.为了方便对比分析,图 8 给出最低频干涉图直接解缠结果,从目视效果来看,DEM 辅助的解缠结果基本恢复出山势的走向,细节纹理增多,明显优于图 8,为进一步指导较高频干涉图相位解缠奠定了基础.利用基准干涉图依次指导较高频干涉图做差分滤波和相位解缠处理,直至最高频的 0110-0912 干涉图解缠完毕,如图 9 所示.

为了进一步对比分析,图 10 和图 11 分别给出了直接利用最低频干涉图依次指导最高频干涉图的解缠结果和最高频干涉图直接解缠的结果.前者在图像右侧大致恢复了山脉的走向,但整体来看,仍有较多的离散相位,改善的效果有限.后者则整体呈现为杂乱无章的离散相位.DEM 辅助的指导解缠结果(图 9)则几乎完全恢复了山脉的走向,与图 3 的 DEM 基本吻合,优势明显.

为了定量说明本文方法的解算优势,分别统计了 DEM 辅助的指导解缠结果、最低频干涉图依次指导解缠结果和最高频干涉图直接解缠结果的解缠比例(解缠的像素数/干涉图总像素数).干涉图均沿距离向和方位向做了 2:10 的多视处理,图像大小为 2 589×2 727.如表 2 所示,在同时运用最小费用流解缠方法的前提下,本文方法的未解缠点数最少,解缠比例最高.

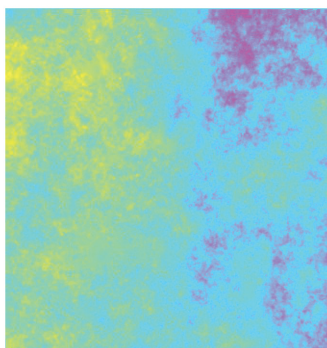


图 6 零中频干涉图初始解缠结果

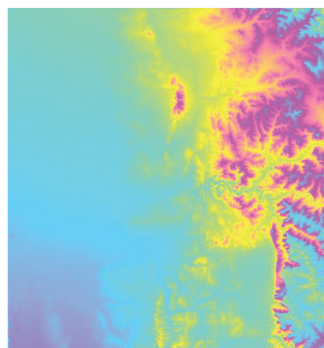


图 7 基准干涉图



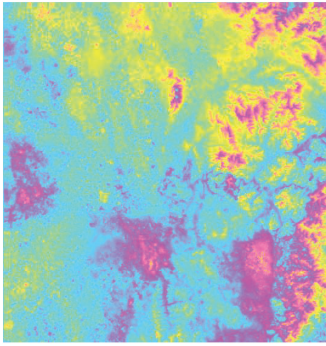


图 8 最低频干涉图直接解缠结果

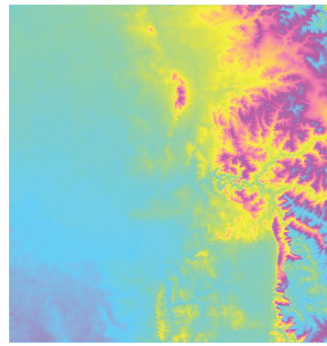


图 9 DEM 辅助的指导解缠结果

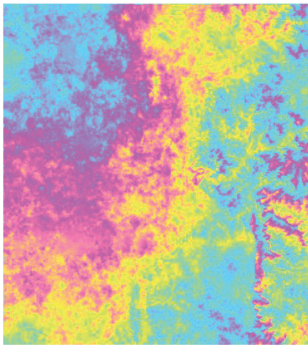


图 10 直接利用最低频干涉图依次指导的解缠结果

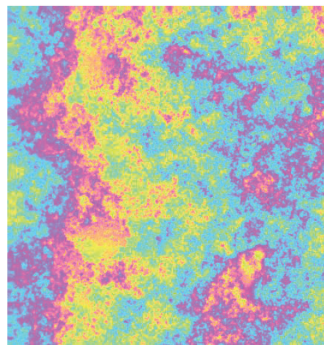


图 11 最高频干涉图直接解缠结果

表 2 邯郸地区解缠指标

多基线相位解缠方法	未解缠点数	解缠比例/%
DEM 辅助指导解缠	413 021	94.15
最低频干涉图依次指导解缠	438 983	93.80
最高频干涉图直接解缠	1 205 893	82.98

### 3 结 论

提出了 DEM 辅助的零中频多基线 InSAR 处理方法,实验证明,从目视效果和解缠百分比统计量来看,DEM 辅助的指导解缠结果可解性最好,细节最多,几乎完全恢复了与 DEM 吻合的山脉走向.与直接利用最低频干涉图依次指导解缠结果和最高频干涉图直接解缠结果相比,具有明显的优势.本文方法既能利用零中频干涉图容易解缠的优势,又能保持高频干涉图的高精度性,解决了高频干涉图频谱混叠、相位欠采样处的解缠难题.

后续研究中,需借助控制信息,定量分析 DEM 辅助指导解缠的可靠性和精度,为多基线 InSAR 技术与外部辅助数据的实用化结合应用提供新思路.

### 参 考 文 献

- [1] 靳国旺,张红敏,徐青.雷达摄影测量[M].北京:测绘出版社,2015.
- [2] 孙方,朱庆林,刘琨,等.典型区域气候下的 D-InSAR 大气形变误差分析[J].电波科学学报,2016,31(5):1023-1027.
- [3] NEUMANN M, FERRO-FAMIL L, REIGBER A. Estimation of forest structure, ground, and canopy layer characteristics from multibaseline polarimetric interferometric SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(3): 1086-1104.
- [4] LIU H, XU Q, JIN G W, et al. MIMO Antenna Polynomial Weighted Average Design Method of Downward-Looking Array SAR[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2017, 2017: 3029847.
- [5] 刘楠,张林让,张娟,等.多频-多基线 MIMO InSAR 及其性能分析[J].系统工程与电子技术,2009,31(9):2090-2095.
- [6] 刘辉,靳国旺,张红敏,等. MIMO 下视阵列 SAR 线阵天线构型设计[J].测绘科学技术学报,2017,34(3):305-310.

- [7] 刘辉,李葛爽.无人机 MIMO 下视阵列 SAR 天线构型设计[J].测绘通报,2016(12):39-43.
- [8] 张红敏.多基线 InSAR 数据仿真及其相位解缠技术研究[D].郑州:解放军信息工程大学,2010.
- [9] 谢先明,皮亦鸣.一种基于多基线组合频率估计的相位展开方法[J].测绘学报,2012,41(1):93-99.
- [10] 于瀚雯,保铮.利用  $L^1$  范数的多基线 InSAR 相位解缠绕技术[J].西安电子科技大学学报,2013,40(4):37-41.
- [11] 刘会涛,邢孟道,保铮.利用  $L^\infty + L^1$  范数的多基线相位解缠绕方法[J].电子与信息学报,2015,37(5):1111-1115.
- [12] 郭立文.多基线 InSAR 数据处理技术及应用研究[D].成都:电子科技大学,2016.
- [13] 葛大庆,王艳,郭小方,等.基于相干点目标的多基线 D-InSAR 技术与地表面形变监测[J].遥感学报,2007,11(4):574-580.
- [14] Ferretti A, Prati C, Rocca F, et al. Multibaseline SAR interferometry for automatic DEM reconstruction (DEM)[J]. Esa Sp, 1997, 414:1809.
- [15] THOMPSON D G, ROBERTSON A E, AMOLD D V, et al. Multi-baseline interferometric SAR for iterative height estimation[C]// 1999 Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS99). Piscataway: IEEE Press, 1999: 251-253.
- [16] 袁志辉,邓云凯,李飞,等.改进的基于最大似然估计的多通道 InSAR 高程重建方法[J].电子与信息学报,2013,35(9):2161-2167.
- [17] 花奋奋,张继贤,黄国满,等.基于严密模型的多基线 InSAR 高程反演方法[J].南京理工大学学报,2014,38(6):726-732.
- [18] 刘辉,靳国旺,张红敏,等.DEM 辅助的 InSAR 零中频处理基线估计方法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2017,45(3):79-84.
- [19] 刘辉,靳国旺,张红敏,等.DEM 辅助的山区 InSAR 相位解缠[J].测绘科学技术学报,2017,34(2):215-220.
- [20] 刘辉.MIMO 稀疏阵列 SAR 天线设计与三维成像技术研究[D].郑州:解放军信息工程大学,2017.

## Interference processing for zero intermediate frequency multi-baseline InSAR assisted by DEM

Liu Hui<sup>1</sup>, Xu Qing<sup>2</sup>

(1.School of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2.School of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Based on the idea of processing assisted by DEM, interference processing method for zero intermediate frequency multi-baseline InSAR assisted by DEM was proposed. Simulated interferogram using external rough DEM and the lowest-frequency original interferogram in the multi-baseline interferogram group were made difference processing, and zero intermediate frequency interferogram was obtained. After filtering and unwrapping, the zero intermediate frequency interferogram added back the simulated phase detracted before. Then the reference interferogram was constructed, which is used to guide higher-frequency interferograms phase unwrapping from coarse to fine. And ultimately DEM can be inverted with high accuracy. This method made full use of the easy resolution of zero intermediate frequency interferogram and the high-precision of high-frequency interferograms, and solved the unwrapping problem at the frequency aliasing and the phase under sampling of the high-frequency interferogram. The interference experiment was carried out using ENVISAT ASAR data of six scenes in Handan area. And the effectiveness of proposed method was verified by the results.

**Keywords:** assisted by DEM; zero intermediate frequency; multi-baseline; InSAR; difference

[责任编辑 杨浦]