

自适应伪相干值改进的 InSAR 干涉图 Goldstein 滤波算法

李世金 张书毕 张秋昭 高延东

(中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要 InSAR 技术作为当前反演 DEM 及变形监测的重要手段之一,其干涉图的滤波效果将直接影响着最终获取结果的精度。在 InSAR 干涉相位图滤波算法中,Goldstein 滤波是一种最经典的频率域滤波算法。针对其滤波参数选取的不确定性及全局不合理性问题,提出了一种自适应改进的 Goldstein 干涉图滤波算法。该算法将自适应伪相干值作为滤波参数,使其能够进一步凸显干涉图的质量,对于干涉图质量较好的部分进一步减弱滤波程度以更好地保留相位信息,对于干涉图质量较差的部分进一步增强滤波程度以有效抑制相位噪声。采用 TerraSAR-X/TanDEM-X 数据对改进滤波算法进行了定性及定量分析,结果表明:改进滤波算法在噪声抑制及相位信息保留方面相对于 Goldstein 算法及其改进算法具有明显的优势;此外,枝切树相位解缠及 DEM 反演分析也进一步验证了改进滤波算法的可靠性。

关键词 InSAR 频率域滤波 Goldstein 滤波 滤波参数 伪相干值

中图分类号 TD17, TP391

文献标志码 A

文章编号 1001-1250(2018)-07-152-05

DOI 10.19614/j.cnki.jsks.201807030

Improvement of Goldstein Filtering Algorithm for InSAR Interferogram Based on Adaptive Pseudo-correlation

Li Shijin Zhang Shubi Zhang Qiuzhao Gao Yandong

(School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technique is one of the important methods for inversion of digital elevation model (DEM) and deformation monitoring, the filtering effect of InSAR interferogram will directly affect the accuracy of the final result. Goldstein filtering algorithm represents the most classical frequency domain filtering algorithm for InSAR interferogram. Considering the uncertainty and global irrationality of the filtering parameter selection, a new improvement Goldstein filtering algorithm based on adaptive pseudo-correlation is proposed. According to the basic principal of the improved algorithm, the adaptive pseudo-correlation is taken as the filtering parameter, so as to highlight the quality of interferogram. The filtering strength of the interferogram with high quality can be reduced, so as to preserve the phase information effectively, meanwhile, the filtering strength of the interferogram with low quality can be improved to inhibit the phase noise. The qualitative analysis and quantitative analysis of the performance of the improved algorithm are done based on TerraSAR-X/TanDEM-X data. The study results show that the performance of noise suppression and phase fringe detail information preserving of the improved algorithm is superior the one of Goldstein filtering algorithm and its improved algorithms, beside that, the reliability of the improved algorithm is further demonstrated by the analysis of branch-cut phase unwrapping and DEM inversion.

Keywords InSAR, Frequency domain filtering, Goldstein filtering, Filtering parameter, Pseudo-correlation

合成孔径雷达干涉测量技术(Interferometric
synthetic aperture radar, InSAR)是一种用于提取地

表三维变化信息的空间对地观测技术,是传统合成
孔径雷达遥感技术与无线电波干涉测量技术的有

收稿日期 2018-04-02

项目基金 卫星测绘技术与应用国家测绘地理信息局重点实验室开放基金项目(编号:KLSMTA-201708);国家自然科学基金项目(编号:41774026)。

作者简介 李世金(1995—),男,硕士研究生。通讯作者 张秋昭(1985—),男,副教授,博士,硕士研究生导师。

效融合。该技术不仅具有成本低、近连续性的特点和远程遥感观测的能力^[1],还能够全天候、全天时、高效率地获取大面积的地面高精度三维信息。因此,InSAR技术在近些年得到了快速发展,在矿区沉降监测^[2]、城市沉降^[3]、地震形变^[4]、火山运动^[5]、山体滑坡^[6-7]及冰川运动^[8]等方面也展现出了强大的技术优势。在InSAR技术的实际应用中,相位解缠的结果将直接决定着地面高程信息的获取精度,而相位解缠的结果又与干涉图的质量密切相关,因此,研究干涉图的滤波算法对于进一步提高干涉图的质量乃至InSAR技术的应用效果大有裨益。

InSAR干涉图滤波算法主要有空间域滤波及频率域滤波2类。其中,空间域滤波最常用的是圆周期均值滤波与圆周期中值滤波,主要根据干涉图的周期性特点,利用局部统计特性来实现滤波。在此基础上,圆周期加权中值滤波算法被提出,该算法融合了上述2种算法的优点,滤波效果有了一定程度提升。上述算法的滤波效果与滤波窗口的尺寸存在着密切的关系,随着滤波窗口的增大,噪声去除效果越来越好,但相应的图像分辨率损失严重。为此,郭交等^[9]将基于局部区域增长算法的窗口自适应获取方法应用到滤波算法中,通过选取均值像素的滤波样本,以提高滤波的自适应效果;易辉伟等^[10]提出了改进的梯度自适应滤波算法,根据不同方向的相位梯度信息来获取相应像素点的加权系数,进而实现自适应滤波。频率域滤波算法则是依据傅里叶变换原理将干涉图从空间域转换至频率域,在频域内依据相位噪声和信号的频谱特性进行滤波处理,极大提升了相位信息的保留能力。最经典的滤波算法为Goldstein滤波^[11],该算法对具有一定重叠效果的相位块在频率域采用平滑滤波器处理后,并用固定的滤波参数对其功率谱进行处理。鉴于滤波参数的选取具有一定的主观性,Baran等^[12]利用相干值均值代替滤波参数,使其能够根据干涉图的相干性实现自适应滤波;Suo等^[13]为了进一步提升该算法相位噪声的抑制能力,利用相干值的平方值代替相干值均值,在相同的滤波窗口下进一步增强了滤波强度;为进一步提升自适应效果,Zhao等^[14]利用伪相干值均值代替相干值均值作为滤波参数,并进行迭代处理,在一定程度上避免了偏置样本一致性对滤波参数的影响;Liu等^[15]提出了分窗口模型滤波算法,将改进后的经验模型分解(Empirical mode decomposition, EMD)算法^[16]与Goldstein滤波算法^[17]作为不同窗口的滤波模型。

上述改进滤波算法虽然在一定程度上提升了算

法的滤波性能,但总体上无法有效兼顾相位噪声抑制及相位信息保留两方面。因此,本研究采用伪相干值对Goldstein算法的滤波参数进行进一步优化,使其能够根据不同阈值选取不同的自适应模型,进而自适应确定最优滤波参数,并根据阈值自适应确定平滑窗口尺寸,对干涉图的功率谱进行平滑处理。

1 干涉图滤波算法

1.1 Goldstein滤波

Goldstein滤波^[11]首先将干涉图划分为若干个相互重叠的相位块,然后依据傅里叶变换将其转换至频率域,对其功率谱进行相应的平滑处理:

$$H(u,v) = S\{|F(u,v)|^\alpha\} \cdot F(u,v) \quad (1)$$

式中, $S\{\cdot\}$ 为平滑算子; $F(u,v)$ 和 $H(u,v)$ 分别为滤波前后的频率域干涉图; (u,v) 为频率域中干涉图中某像素点的坐标值; α 为滤波参数, $\alpha \in [0, 1]$ 。

当 $\alpha=0$ 时, $S\{|F(u,v)|\}=1$,表明无滤波效果;当 $\alpha=1$ 时, $S\{|F(u,v)|\}$ 表示由矩形平滑窗口构成的低通滤波器,表明滤波效果非常强。此外,较大的相位块尺寸和高滤波参数 α 值,有利于增强干涉图的相干性;相位块相互重叠(重叠度不宜小于75%)有助于减弱干涉图边界处的不连续性。

考虑到干涉图中相位噪声分布的不均匀性,如果对整个干涉图采用固定的 α 值进行滤波,易降低滤波的自适应性,可能会在高相干地区存在过滤波,而在低相干地区存在欠滤波的现象,因此难以选择合理的全局滤波参数 α 值。对此,Baran等^[12]采用相干值的均值代替 α 值,使得干涉图非相干性区域的滤波程度强于相干性区域:

$$H(u,v) = S\{|F(u,v)|^{1-\bar{\gamma}}\} \cdot F(u,v) \quad (2)$$

式中,参数 $\bar{\gamma}$ 表示相干图中有效相位块(滑动窗口减去重叠区域)上相干系数绝对值的平均值。

Zhao等^[14]利用伪相干值均值代替 α 值,相对于Baran滤波算法在一定程度上避免了偏置样本一致性对 α 参数估计的影响,其伪相干值(P_c)可通过下式求取:

$$P_c = \left| \sum_{i=1}^n \phi_i \right| / \left| \sum_{i=1}^n |\phi_i| \right| \quad (3)$$

式中 ϕ_i 为第 i 个像素的复数相位值; n 为像素点数量。

于是,滤波参数 $\alpha = 1 - \bar{P}_c$ (\bar{P}_c 为当前滤波窗口的伪相干值均值)。

1.2 改进后的滤波算法

为进一步提高Goldstein滤波算法的自适应性,本研究对获取的伪相干值进行进一步优化,首先对

大于阈值 T 的伪相干值进一步增大,对小于该阈值的伪相干值进一步减小;然后将当前滤波窗口中改进后的伪相干值均值作为滤波参数,并根据设定的阈值自适应确定平滑窗口尺寸。为此,构建的改进后的伪相干系数 P_c 的取值模型为

$$P_c = P_c^\beta \begin{cases} 1 \leq \beta < 2 & P_c < T \\ 0 < \beta < 1 & P_c \geq T \end{cases} \quad (4)$$

为有效兼顾滤波算法在噪声抑制及相位信息保留两方面的效果,需要有效确定 α 值,本研究构建了随伪相干值(P_c)自适应变化的 α 取值模型。

当 $P_c \geq T$ 时($0 < \beta < 1$),模型为

$$\alpha = \ln \left[\frac{2.71 \cdot (T + \frac{1-2.71 \cdot T}{2.71-1})}{P_c + \frac{1-2.71 \cdot T}{2.71-1}} \right], \quad (5)$$

当 $P_c < T$ 时($1 \leq \beta < 2$),模型为

$$\alpha = 1 + \ln \left(P_c \cdot \frac{1-2.71}{T} + 2.71 \right), \quad (6)$$

式中, $T = \lambda \bar{P}_c$, \bar{P}_c 为改进前整体伪相干值的均值;系数 λ 主要根据干涉图的实际情况经过试验归纳分析获得。

式(5)、式(6)中 T 值选取依据为:当 \bar{P}_c 较大时,即干涉图质量整体较好,滤波重点应为提升相位细节信息,故 T 值应相对较小;当 \bar{P}_c 较小时,滤波重点应为提升去噪效果,故 T 值应相对较大。本研究经过仿真试验,构建的 λ 取值模型为

$$\lambda = \begin{cases} 0.1 & \bar{P}_c \geq 0.7 \\ 0.84/\bar{P}_c & 0.6 < \bar{P}_c < 0.7 \\ 1.36/\bar{P}_c & 0.5 < \bar{P}_c \leq 0.6 \\ 0.56/\bar{P}_c & 0.4 < \bar{P}_c \leq 0.5 \\ 1 & \bar{P}_c \leq 0.4 \end{cases} \quad (7)$$

为进一步提升算法的自适应滤波效果,依据上述确定的阈值进一步自适应确定平滑窗口尺寸。当默认平滑窗内的伪相干值均值于小阈值时,对其平滑窗口尺寸进行增大处理,直至窗口内的伪相干值均值大于阈值为止,以提高算法在低相干区域的降噪能力。随后采用二维傅里叶变换后的平滑窗口对获取的相位块的功率谱进行平滑处理^[13],并运用改进后伪相干值进一步确定滤波参数,最终获取滤波后的干涉相位。改进后的Goldstein滤波算法可表述如下

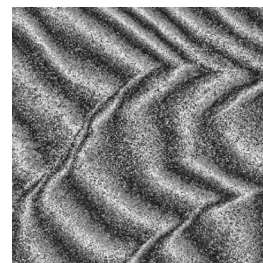
$$H(u,v) = \{ |F(u,v)|_{m \times m} \}^{1-\bar{P}_c} \cdot F(u,v), \quad (8)$$

式中, $|*|_{m \times m}$ 为傅里叶变换后的平滑窗算子; m 为窗口尺寸。

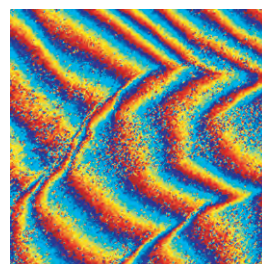
2 算法试验

2.1 TerraSAR数据试验

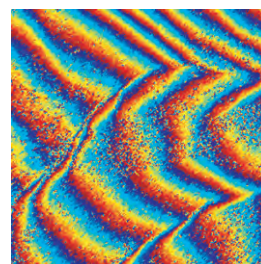
本研究采用TerraSAR数据进行滤波分析,结果见图1、表1。



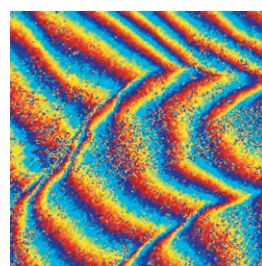
(a) 含噪声干涉图



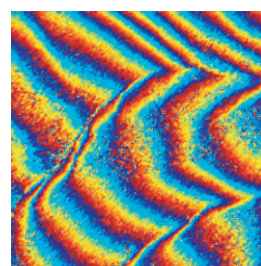
(b) Goldstein滤波



(c) Baran滤波



(d) Zhao滤波



(e) 本研究算法

图1 不同滤波算法处理后的干涉图

Fig. 1 Interferogram filtered by different filter algorithms

表1 不同滤波算法处理后干涉图质量评价指标值

Table 1 Quality evaluation index value of interferogram filtered by different filtering algorithms

滤波算法	残差点/个	EPI
Goldstein滤波	5 035	0.463 5
Baran滤波	4 642	0.479 0
Zhao滤波	5 124	0.477 5
本研究算法	2 969	0.494 9

注:原始含噪声干涉图中残差点有26 137个。

分析图1可知:在高相干性区域4种滤波算法的滤波效果基本相似,而在中部及右下角相干性较低的区域,本研究算法的去噪效果明显优于其余3种算法。

分析表1可知:4种滤波算法的噪声抑制能力均较理想,其中Goldstein滤波与Zhao滤波处理后的干涉图中剩余的残差点数量较接近,相应的噪声去除率分别为80.74%、80.40%;Baran滤波效果略优于前2种算法,噪声抑制率约82.24%;本研究算法的噪声抑

制率达到88.64%,并且该算法的EPI明显高于其余3种算法,表明该算法不仅滤波性能较好,而且具有良好的相位保持能力。

在上述分析的基础上,采用GAMMA软件中的枝切树相位解缠模块对不同滤波算法处理后的干涉图分别开展了相位解缠工作,结果如图2所示。分析图2可知:由于残余残差点的影响,易导致解缠结果中出现大量的未解缠区域,经过本研究算法滤波后的干涉图的整体解缠效果明显优于Goldstein滤波、Baran滤波以及Zhao滤波,尤其是图中标记区域,未解缠区域明显少于其余3种算法;此外,Zhao滤波算法处理后的干涉图的解缠结果中出现了大量误差传递现象(图2(c)),本研究算法则无此现象,进一步证明了该算法的有效性。

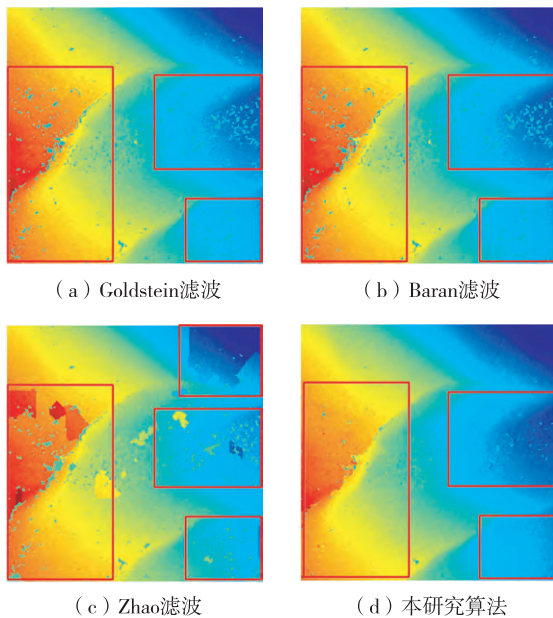


图2 4种滤波算法处理后的干涉图相位解缠结果

Fig. 2 Phase unwrapping results of interferogram filtered by four filtering algorithms

2.2 DEM反演分析

为进一步验证本研究算法对于实测数据的处理效果,采用1组 $5\,000 \times 5\,000$ 的TeraaSAR/TanDEM数据进行了DEM反演分析。首先对比分析不同滤波算法对于该数据的滤波效果,然后采用GAMMA软件对其进一步处理,对不同滤波算法处理后获取的高程精度进行比较分析。

本研究采用去地势后的干涉图进行试验。分析图3、表2可知:4种滤波算法对图3(a)中标定区域的滤波效果均较好,噪声去除率依次为86.31%、86.70%、86.62%、90.51%;本研究算法滤波后的干涉图中的残余相位噪声点明显少于其余3种算法,并且该算法处理后的干涉图的EPI指数明显大于其余3

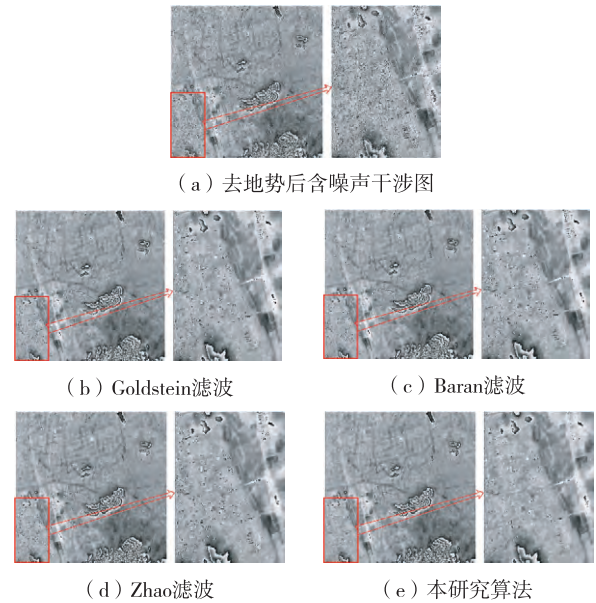


图3 不同滤波算法处理后的干涉图

Fig. 3 Interferogram filtered by different filtering algorithms

表2 4种滤波算法处理后干涉图质量评价指标值

Table 2 Quality evaluation index value of interferogram filtered by four filtering algorithms

滤波算法	残差点/个	EPI
Goldstein滤波	4 531	0.294 8
Baran滤波	4 402	0.314 8
Zhao滤波	4 429	0.340 6
本研究算法	3 141	0.435 4

注:原始含噪声干涉图的残差点数量有33 096个。

类算法。

对不同滤波算法处理后的干涉图运用GAMMA软件处理后获取的地距结构干涉高程图如图4所示。依据图4提取的高程信息与SRTM高程数据的RMSE值如表3所示。

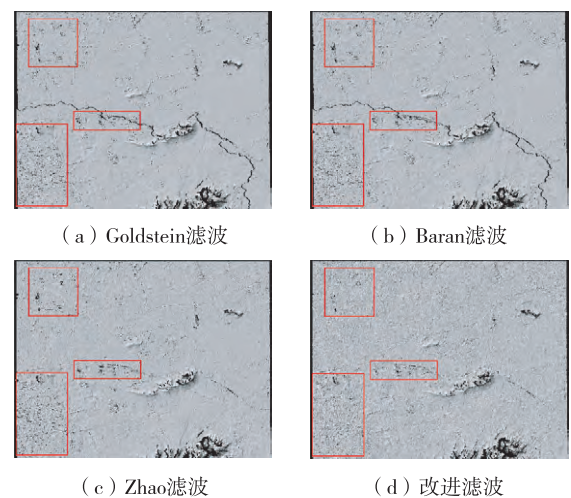


图4 4种滤波算法处理后的干涉高程图

Fig. 4 Elevation map processed with four filtering algorithms

表3 高程数据RMSE值
Table 3 RMSE value of elevation data

Goldstein滤波	Baran滤波	Zhao滤波	本研究算法
10.334	10.311	2.496	2.147

分析图4及表3可知:经过Goldstein滤波、Baran滤波及Zhao滤波算法处理后获取的干涉高程图均出现了大量空洞现象,主要是由于残余的噪声点影响了后续的枝切树相位解缠效果,导致相位解缠后出现了“孤岛”现象,最终影响了高程信息的提取精度;本研究算法处理后获取的干涉高程图未出现该现象,并且相应的RMSE值明显小于其余3种算法。

3 结 语

采用伪相干值对Goldstein滤波算法的滤波参数及滤波窗口进行了优化,TerraSAR-X/TanDEM-X数据滤波分析以及DEM反演分析表明,改进后的滤波算法在噪声抑制及条纹相位信息保持方面优于Zhao算法、Baran算法以及Goldstein算法,并且在高程信息提取精度方面也有明显优势。

参 考 文 献

- [1] 曹将兵. InSAR中干涉条纹图滤波方法的研究[D].北京:中国地质大学(北京),2007.
Cao Jiangbin. Study on the Filtering Method of the InSAR Interference[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2007.
- [2] 刘晓菲,邓喀中,范洪冬,等. D-InSAR监测老采空区残余变形的试验[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 467-472.
Liu Xiaofei, Deng Kazhong, Fan Hongdong, et al. Study of old goaf residual deformation monitoring based on D-InSAR techniques[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3): 467-472.
- [3] Abdikan S, Arıkan M, Sanli F B, et al. Monitoring of coal mining subsidence in peri-urban area of Zonguldak city (NW Turkey) with persistent scatterer interferometry using ALOS-PALSAR[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(9): 4081-4089.
- [4] Clarke P J, Paradissis D, Briole P, et al. Geodetic investigation of the 13 May 1995 Kozani-Grevena (Greece) Earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 24(6): 707-710.
- [5] Briole P, Massonnet D, Delacourt C. Post-eruptive deformation associated with the 1986-87 and 1989 lava flows of Etna detected by radar interferometry[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 24(1): 37-40.
- [6] Singleton A, Li Z, Hoey T, et al. Evaluating sub-pixel offset techniques as an alternative to D-InSAR for monitoring episodic landslide movements in vegetated terrain[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 147(9): 133-144.
- [7] Tang Y, Zhang Z, Wang C, et al. Characterization of the giant landslide at Wenjiagou by the insar technique using TSX-TDX CoSSC data[J]. Landslides, 2015, 12(5): 1-7.
- [8] Goldstein R M, Engelhardt H, Kamb B, et al. Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: application to an antarctic ice stream[J]. Science, 1994, 262(5139): 1525-1530.
- [9] 郭 交,李真芳,刘艳阳,等. 一种InSAR干涉相位图的自适应滤波算法[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2011, 38(4): 77-81.
Guo Jiao, Li Zhenfang, Liu Yanyang, et al. New adaptive noise suppressing method for interferometric phase images[J]. Journal of Xi'an University: Natural Science Edition, 2011, 38(4): 77-81.
- [10] 易辉伟,朱建军,陈建群,等. 一种改进的InSAR干涉图复数空间自适应滤波[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2013, 44(2): 632-641.
Yi Huiwei, Zhu Jianjun, Chen Jianqun, et al. An improved adaptive algorithm for filtering InSAR interferogram in complex plane[J]. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2013, 44(2): 632-641.
- [11] Goldstein R M, Werner C L. Radar interferogram filtering for geophysical applications[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(21): 4035-4038.
- [12] Baran I, Stewart M P, Kampes B M, et al. A modification to the Goldstein radar interferogram filter[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2003(9): 2114-2118.
- [13] Suo Z, Zhang J, Li M, et al. Improved InSAR phase noise filter in frequency domain[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2015(2): 1185-1195.
- [14] Zhao C Y, Zhang Q, Ding X L, et al. An iterative Goldstein SAR interferogram filter[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(11): 3443-3455.
- [15] Liu G, Song R, Guo H, et al. Filtering SAR interferometric phase noise using a split-window model[J]. Remote Sensing Letters, 2016, 7(8): 800-809.
- [16] Song R, Guo H, Liu G, et al. Improved Goldstein SAR interferogram filter based on empirical mode decomposition[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2014, 11(2): 399-403.
- [17] Jiang M, Ding X, Li Z, et al. The improvement for Baran phase filter derived from unbiased InSAR coherence[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2014(7): 3002-3010.

(责任编辑 王小兵)