

## InSAR 矿区形变监测的边缘保持-Goldstein 组合滤波方法

易辉伟<sup>1,2</sup>, 朱建军<sup>1,2</sup>, 李健<sup>1,2</sup>, 李佳<sup>1,2</sup>, 严新生<sup>3</sup>, 陈树泉<sup>3</sup>

- (1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
2. 湖南省普通高校精密工程测量及形变灾害监测重点实验室, 长沙 410083;
3. 广东省江门市勘察院, 江门 529040)

**摘要:** 介绍 InSAR 技术用于监测矿区地表形变的干涉图滤波方法, 为避免对密集条纹强噪声干涉图重复进行 Goldstein 等方法过度滤波而导致的条纹信息丧失, 提出一种边缘保持-Goldstein 组合滤波方法。采用具有强条纹保持能力的边缘保持滤波方法进行滤波, 根据其伪相干值及相位标准偏差改进 Goldstein 方法的滤波因子, 从而达到更有效滤波的目的。结果表明: 边缘保持-Goldstein 组合滤波比单次 Goldstein 滤波残差点改善率提高了 23.7%, 边缘保持指数高达 0.74, 效果优于二次 Goldstein 滤波效果。此法结合频域和空域滤波的优点, 对于高密度条纹强噪声干涉图不仅具有较强的噪声控制能力, 而且具有很强的条纹细节保持能力。

**关键词:** INSAR; 矿区; 干涉图; 伪相干值; 边缘保持; Goldstein 滤波

中图分类号: TG146.4

文献标志码: A

## An edge preservation-Goldstein filter for InSAR interferograms used in monitoring deformation of mining area

YI Hui-wei<sup>1,2</sup>, ZHU Jian-jun<sup>1,2</sup>, LI Jian<sup>1,2</sup>, LI Jia<sup>1,2</sup>, YAN Xin-sheng<sup>3</sup>, CHEN Shu-quan<sup>3</sup>

- (1. School of Earth Science and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Key Laboratory of Precise Engineering Surveying and Deformation Hazard Monitoring of Hunan Province, Changsha 410083, China;
3. Institute of Investigation and Surveying of Jiangmen City, Jiangmen 529040, China)

**Abstract:** The filters for InSAR interferograms used in monitoring mining area deformation were introduced. The edge-preserved Goldstein filter was presented in order to avoid the loss of fringe detail of InSAR interferograms with strong noise and dense fringes caused by over filtering when processed repeatedly by traditional methods such as Goldstein filter. The interferogram was filtered by edge-preservation filter with strong edge-preserving performance. The result was further smoothed by the improved Goldstein filter, whose filtering parameter was determined by pseudo-coherence and phase standard deviation derived from the result. The experiment results demonstrate that the new filter is 23.7% higher than that of once Goldstein filter in noise reduction while its edge preservation is 0.74, superior to twice Goldstein filter. This method performs well not only in noise reduction but also in detail preservation when applied to InSAR interferogram with strong noise and dense fringes.

**Key words:** InSAR; mining area; interferogram; pseudo-coherence; edge-preservation; Goldstein filter

InSAR 技术由于其监测范围大、精度高、周期短及无接触式等特点, 已广泛应用于矿区地表形变的监

测中<sup>[1-2]</sup>, 然而 InSAR 的精度和可靠性在很大程度上依赖于由两幅或多幅 SAR 图像所形成干涉图的质量<sup>[3]</sup>。

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2012AA121301); 国家自然科学基金资助项目(40974006, 40774003, 40901172); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0570); 中南大学学位论文创新基金资助项目(2010ssxt228)

收稿日期: 2011-11-27; 修订日期: 2012-04-27

通信作者: 易辉伟, 博士研究生; 电话: 0731-88660089; E-mail: yhw74@163.com

受时空失相关、热噪声以及大气等因素影响,干涉图相位一般存在强噪声,为解缠顺利及精确估计地形形变,必须对 SAR 干涉图进行滤波<sup>[4]</sup>。

目前, SAR 干涉图滤波方法主要分为频域滤波法和空域滤波法两类。频域滤波法有 Goldstein<sup>[5]</sup>、小波和卡尔曼等基于傅里叶变换对影像谱分量进行处理的滤波方法。Goldstein 为频域经典滤波法,由于去噪能力强且步骤简单而得到广泛应用,如 Gamma 和 Doris 等许多国际商业或免费 SAR 数据处理软件都采用该方法。Goldstein 滤波法将图像分解到频率空间,利用相干斑噪声和信号的频谱特性不同,即噪声在频谱空间属于宽带信号且幅值低,而信号则属于窄带信号且幅值高,通过在频率域实施平滑,使得属于噪声的宽带信号幅值均匀而属于信号的窄带信号幅值相对增大,从而达到去噪的目的。后来发展的 LZW<sup>[6]</sup>、信噪比<sup>[7]</sup>及相位偏差<sup>[8]</sup>等方法都根据噪声强度不同程度地改善了滤波因子。该方法难以检测到图像的边缘特征,在去除噪声的同时,也损失了图像边缘细节信息。小波去噪有矢量分离式<sup>[9]</sup>和小波中值滤波<sup>[10]</sup>等方法,可在一定程度保留细节,但因小波阈值为人工选取,因此,不便于使用,小波-维纳组合法<sup>[11]</sup>进行了较好的改进。卡尔曼<sup>[12]</sup>和格网值滤波法<sup>[13]</sup>都是通过对相位值进行估计得到滤波。空域滤波法<sup>[14-22]</sup>有 Lee 滤波法、数学形态法、最优化融合法、堆栈法、区域增长法、乘性加性噪声模型法、中值-自适应滤波、等值线法及边缘保持法等,是一种在图像空间借助模板卷积来实现滤波的方法。为避免缠绕相位的影响,通常将 InSAR 干涉图的相位图和灰度图对应位置的值构成的复数分解为实部和虚部,分别对实部和虚部进行滤波,最后合并得到滤波后的相位图。Lee 滤波法<sup>[14]</sup>为典型的空域滤波,其利用局部统计特性进行 SAR 图像去噪,但视觉效果较差,边缘保持只在同质区比较有效;数学形态法<sup>[15]</sup>在 Lee 滤波法中的非同质区域采取膨胀腐蚀增强了边缘。Lee 滤波法基于乘性噪声模型估计像元的真实值,由于该模型未考虑加性噪声问题,并且需要求坡度值、检测条纹边缘及局部解缠,因而使用受限。针对此缺点,尹宏杰等<sup>[16]</sup>提出的最优化融合方法根据干涉图的相干性来选择融合方向窗口的数量,增强了 Lee 算法的稳健性。堆栈法<sup>[17]</sup>将图像分成若干二进制图像,利用布尔判断式去噪再重新组合;区域增长法<sup>[18]</sup>基于种子点向外增长直至边缘,取决于边缘判断条件;乘性加性噪声模型法<sup>[19]</sup>认为对角元素为乘性模型而非对角元素为加性模型,该方法需进一步验证。以上 3 种方法缺乏自适应性。中值-自适应滤波法<sup>[20]</sup>适用于宽条纹去噪,对于密集细条纹容易出现

混迭现象;等值线滤波法<sup>[21]</sup>中的等值线窗口的提取受噪声程度和条纹率的影响。2008 年,王兴旺等<sup>[22]</sup>提出了边缘保持滤波法,该法能够较好地保留条纹细节。

SAR 干涉图滤波要达到的滤波效果需在尽量去除相位噪声的同时,保留图像的条纹信息。一般情况下,频域滤波法的去噪效果好而空域滤波法的细节信息保持能力强,因此,本文作者以伪相干值为桥梁,并用具有局部统计特性的相位标准偏差改善 Goldstein 方法的滤波因子,将边缘保持和 Goldstein 这两种滤波方法组合起来,形成边缘保持-Goldstein 组合滤波方法,该方法充分结合频域滤波法和空域滤波法的优点,能有效控制噪声并保持条纹细节,且适用于条纹密集的干涉图。

## 1 基于伪相干值的边缘保持-Goldstein 噪声控制原理

### 1.1 边缘保持滤波法

边缘保持滤波法以方差作为各个邻域灰度均匀性的量度。若像素邻域含有尖锐的边缘,则其灰度方差较大;而不含边缘或灰度均匀的邻域,方差则较小。通过找到最小方差的邻域,对邻域内像素取均值,可达到既消除部分噪声、又不破坏邻域边界细节的效果。考虑到条纹边界形状的多样性,对图像上任意像素 $(x, y)$ 采用如图 1 所示的模板,其中包括一个  $3 \times 3$  的正方形,4 个五边形和 4 个六边形共 9 个邻域。由于五边形和六边形在 $(x, y)$ 处都有锐角,因此,即使像素 $(x, y)$ 位于一个复杂形状的边缘处,也能找到均匀的邻域。

### 1.2 Goldstein 滤波法

Goldstein 滤波法主要通过对图像频谱进行平滑处理而达到去噪目的,其算法如下:

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

式中:  $Z(u, v)$  为对图像进行傅里叶变换得到的频谱值;  $S\{ \}$  是平滑函数;  $Z'(u, v)$  是平滑处理后的频谱值;  $\alpha$  的取值范围为 0~1, 滤波的强度随  $\alpha$  的增大而增大,  $\alpha$  为 0 时不滤波。BARAN 等<sup>[23]</sup>将  $\alpha$  改进为  $1 - \bar{\gamma}$ ,  $\bar{\gamma}$  为有效窗口(通常取  $32 \times 32$  像素窗口为滑动窗口,其中间的 4 行 4 列  $4 \times 4$  为有效窗口)内相干值平均值,这种自适应的 Goldstein 方法滤波效果更好。

经边缘保持法滤波后的干涉图,其图像质量可用伪相干值<sup>[24]</sup>来衡量,其计算公式如下:

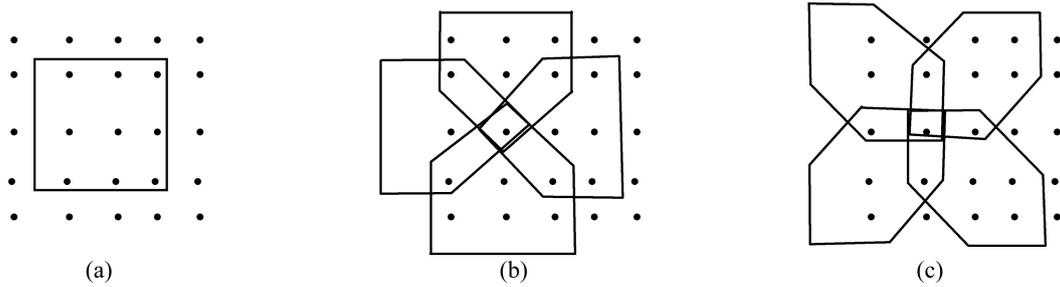


图 1 边缘保持法对应模板

Fig. 1 Templates for selective edge-preservation filter: (a) One square; (b) Four pentagons; (c) Four hexagons

$$p_c = \frac{\sqrt{[\sum \cos \phi(i, j)]^2 + [\sum \sin \phi(i, j)]^2}}{N} \quad (2)$$

式中:  $N$  是计算窗口内像素的个数;  $\phi(i, j)$  是干涉图相位值。伪相干值由干涉图统计得到, 随着相位噪声强度的降低而增大, 最大值不超过 1。伪相干值是边缘保持滤波结果的反映, 滤波后图像相干性得到增强。此外, 相位标准偏差具有较强的局部统计特性, 表征图像噪声的强度, 且与图像相干性存在如下关系<sup>[6]</sup>:

$$\sigma_\phi^2 = E[(\phi - \phi_0)^2] = \frac{\pi^2}{3} - \pi \arcsin |\gamma| + \arcsin^2 |\gamma| - \frac{Li_2(|\gamma|^2)}{2} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_\phi$  为相位标准偏差;  $\gamma$  为干涉图相干值;  $\phi$  为干涉图相位值;  $\phi_0$  为相位的期望值;  $Li_2(\cdot)$  为一种 Euler 算法, 表示为

$$Li_2(\gamma^2) = \sum_{k^2} \frac{|\gamma|^2}{k^2} \quad (4)$$

### 1.3 边缘保持-Goldstein 组合滤波方法

综合考虑具体两个因素, 提出用式(5)所示改进 Goldstein 法的滤波因子, 使其对强噪声区进行强滤波, 对弱噪声区进行弱滤波, 从而使 Goldstein 方法具有更强的局部自适应能力。

$$Z'(u, v) = S\{ |Z(u, v)| \}^{(1-\bar{p}_c) \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_{\max}}} Z(u, v) \quad (5)$$

式中:  $\bar{p}_c$  为有效窗口内伪相干性平均值;  $\bar{\sigma}$  为有效窗口内相位标准偏差;  $\sigma_{\max}$  为  $\bar{\sigma}$  的最大值。边缘保持-Goldstein 组合滤波方法首先采用边缘保持法对干涉图进行初步滤波, 在去除一定噪声的同时, 保持每个像素与其邻域的关系; 再采用式(5)进行 Goldstein 滤波,

由于  $\bar{p}_c$  和  $\bar{\sigma}$  均能有效反映噪声分布, 本文作者采用  $(1-\bar{p}_c) \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_{\max}}$  控制滤波强度, 不仅滤波效果好, 而且条纹信息能得到保持; 最后按照式(6)将 Goldstein 滤波结果转换到空间域。

$$Z'(r, a) = F^{-1}(Z(u, v)) \quad (6)$$

式中:  $r$  为距离向向量;  $a$  为方位向向量;  $F^{-1}$  为傅立叶反变换。

边缘保持-Goldstein 组合滤波的具体步骤如下:

- 1) 分别提取干涉图的实部和虚部, 对于每个像素, 分别计算上述 9 个对应模板的均值和方差;
- 2) 选取方差最小的模板, 将该模板的均值作为该像素的实部和虚部输出值;
- 3) 将两个新矩阵重新组合, 生成干涉图;
- 4) 取  $32 \times 32$  像素的滑动窗口, 每次滑动 4 个像素, 滑动窗口中间的 4 行 4 列为有效窗口, 计算有效窗口的  $\bar{p}_c$  和相位标准偏差均值  $\bar{\sigma}$ ;
- 5) 在有效窗口中对复数进行离散傅立叶变换;
- 6) 对取出的部分按改进后的滤波因子进行平滑处理;
- 7) 将平滑后的图像反变换到空间域。

## 2 模拟数据验证

利用模拟数据, 去噪结果可与无噪图直接比较。采用多分形技术模拟数字地面模型(DEM), 再由模拟的 DEM 根据 ERS1/2 的成像几何参数和给定垂直基线长度(本实验中为 200 m)模拟出缠绕的相位, 最后根据相位噪声与视数及相干性的关系模拟出给定视数的相位噪声图, 该图既含乘性噪声又含加性噪声。图 2(a) 所示为模拟的  $512 \times 512$  像素原始相位图; 图 2(b) 所示为视数为 2 的模拟含噪相位图, 对其分别用一次、二

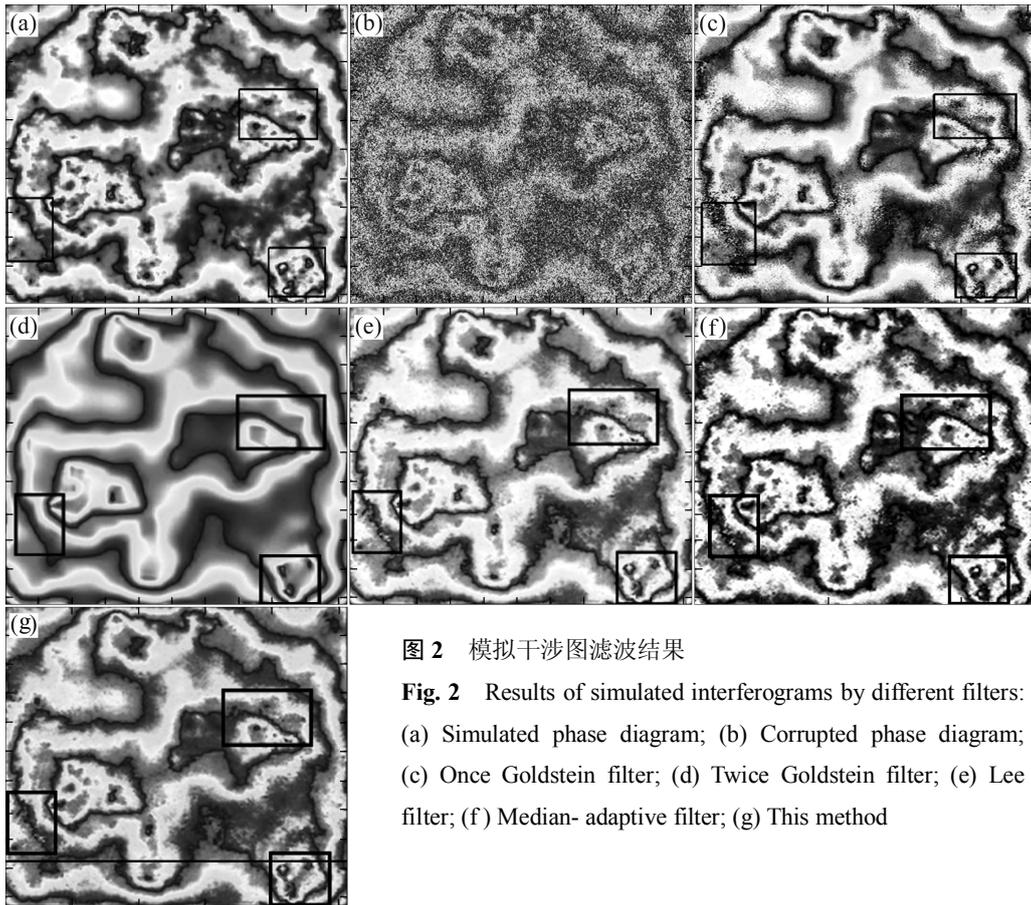


图2 模拟干涉图滤波结果

**Fig. 2** Results of simulated interferograms by different filters: (a) Simulated phase diagram; (b) Corrupted phase diagram; (c) Once Goldstein filter; (d) Twice Goldstein filter; (e) Lee filter; (f) Median- adaptive filter; (g) This method

次 Goldstein 滤波法、Lee 滤波法、中值-自适应滤波法及本研究所提出的新方法进行滤波，结果分别为图 2(c)~(g)所示。从目视效果看，一次 Goldstein 滤波去噪效果不好，很多区域仍残存较多噪声，而有些区域条纹细节未能有效保持；二次 Goldstein 过度滤波，条纹高度平滑，丢失了更多边缘信息，如图 2(d)中右上、左下及右下矩形区域所示；Lee 滤波噪声分布不均匀，有些区域仍滞留了噪声，如图 2(e)中左下矩形所示；中值-自适应滤波去噪均匀，边缘保持良好，但仍有少量噪声残留并渗入相位，条纹比原始图更粗糙。本文提出的方法根据边缘保持滤波结果的伪相干值和相位标准偏差估计噪声强度，并用  $(1 - \bar{p}_c) \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_{\max}}$  调节 Goldstein 滤波强弱，在去除大量噪声的同时较好地保护了条纹的曲折度，滤波结果更接近原始相位图。

图 3 所示为图 2 对应的第 420 行(如图 2(g)黑线所示)剖面线图。图 3(a)和(b)所示分别为不含噪声和含噪声的相位剖面线；图 3(c)~(g)所示分别为图 2 中对应方法的相位剖面线。可见，一次 Goldstein 滤波剖面线与原始相位图相比，仍有较多噪声影响其相位值，局部有毛刺；二次 Goldstein 剖面线损失了许多相位细节，且随着滤波次数的增加，此现象更加明显；Lee

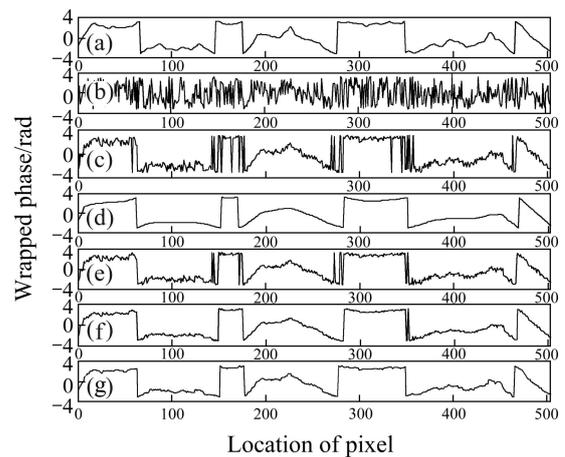


图3 模拟干涉图滤波结果第 420 行剖面图

**Fig. 3** Cross sections of line 420 of simulated interferograms filtered by different filters: (a) Simulated phase; (b) Corrupted phase; (c) Once Goldstein filter; (d) Twice Goldstein filter; (e) Lee filter; (f) Median-adaptive filter; (g) This method

滤波在局部区域仍保留噪声；中值-自适应滤波条纹保持较好，但仍有少量毛刺，相位受残余噪声影响略显粗糙；本方法的剖面图几乎没有毛刺，噪声也大量减少，整条曲线比较平滑，不仅去噪效果良好，而且

有效保持了相位细节, 其剖面图与原始图更好地保持了一致。

### 3 真实数据验证

以意大利 Marini 矿区的一幅  $1\,200 \times 1\,200$  像素的干涉雷达降轨图像为实验对象, 如图 4 所示, 该图由欧洲航天局 ERS-2 卫星于 2000 年 9 月 6 日和 10 月 11 日分别获取(幅框号: 2583, 轨道号: 222), 其干涉对垂直基线为 305 m, 方位向经过 5 个像素的多视处理, 分辨率约为  $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ , 其相干值最大为 0.78, 大多在 0.2~0.5 之间, 属于强噪声高密度条纹干涉图。

图 4 所示为 Marini 矿区原始相位干涉图。为便于分析, 分别选取  $300 \times 300$  像素的平缓区 *A* 区和  $200 \times 200$  像素的条纹密集区 *B* 区的滤波结果放大, 结果分别如图 5 和 6 所示。*A* 和 *B* 区的相干值均值分别为 0.42 和 0.31, 属强噪声区。结果显示, 二次 Goldstein 滤波条纹的曲折度明显减小, 变得强直; Lee 滤波和中值-自适应滤波均有残留噪声, 但条纹保护较好; 而本方法的去噪和细节保持均良好。特别是 *B* 区条纹密集且多不连续, 几乎被噪声遮蔽。二次 Goldstein 滤波在强噪声处仍残留若干斑点, 且原图中可观察到的条纹曲度消失, 图 6(c)黑框所示处的条纹连接甚至与原图不一致, 表现为“过滤波”; Lee 滤波和中值-自适应滤波在强噪声处效果不够明显; 本方法滤波使

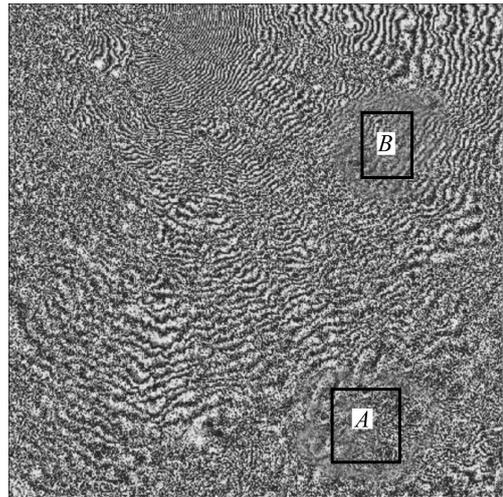


图 4 Marini 矿区原始相位干涉图

Fig. 4 Original phase interferogram of Marini mining region

干涉条纹更加清晰, 并检索出部分被遮蔽的条纹, 使断裂条纹呈现“愈合”趋势, 原先不连续的条纹在一定程度上连续了, 条纹曲度保持得很好, 其保真性和自适应性表现更加突出。

#### 2.3 定量评价

对模拟图和真实图采用正残差点数(Positive residual points, PRPs)、负残差点数(Negative residual points, NRPs)、相位标准偏差(PSD)、相位梯度和值(SPD)及边缘保持指数(EPI)等指标进行比较。

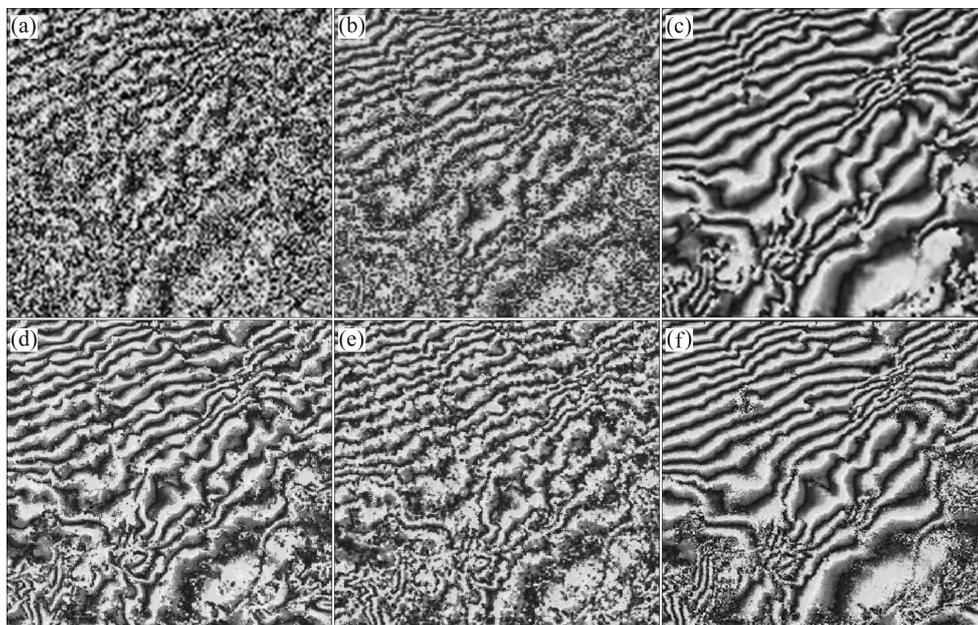


图 5 图 4 中 *A* 区滤波结果放大图

Fig. 5 Enlarged filtering results of zone *A* in Fig. 4: (a) Original phase diagram; (b) Once Goldstein filter; (c) Twice Goldstein filter; (d) Lee filter; (e) Median-adaptive filter; (f) This method

就单个指标而言,残差点数、PSD及SPD都是越小越好,而EPI越接近1越好,如表1和2所列。表1所列为模拟相位图滤波结果,由残差点数可以看出,对于上述5种滤波方法,后4种方法均在较大程度上去除了噪声,二次Goldstein和本方法的去噪能力最强,残差点改善率分别为97.7%和97.2%。本方法的PSD、SPD与二次Goldstein的接近,但二次Goldstein的EPI仅为0.48,表现为“过滤波”,本方法的EPI为0.85,更好地保留了边缘细节,具有较强条纹保持能力,表现为“适滤波”。

表2所列为真实相位图A区和B区的滤波结果,

在去噪方面,一次Goldstein、Lee滤波和中值-自适应滤波的残差点改善率均有所降低,二次Goldstein和本方法的残差点改善率仍保持在90%以上,表明这2种方法能保持很强的去噪能力。本方法在B区的残差点改善率比一次Goldstein的提高了23.7%,且略高于二次Goldstein的,表明其在强噪声条纹密集区自适应性更强。PSD和SPD均以二次Goldstein和本方法的为最小,而本方法在A区和B区仍具有较高的边缘保持指数,分别为0.77和0.74,相比较而言,本方法对于条纹平滑区和条纹密集区都有很好的滤波效果。

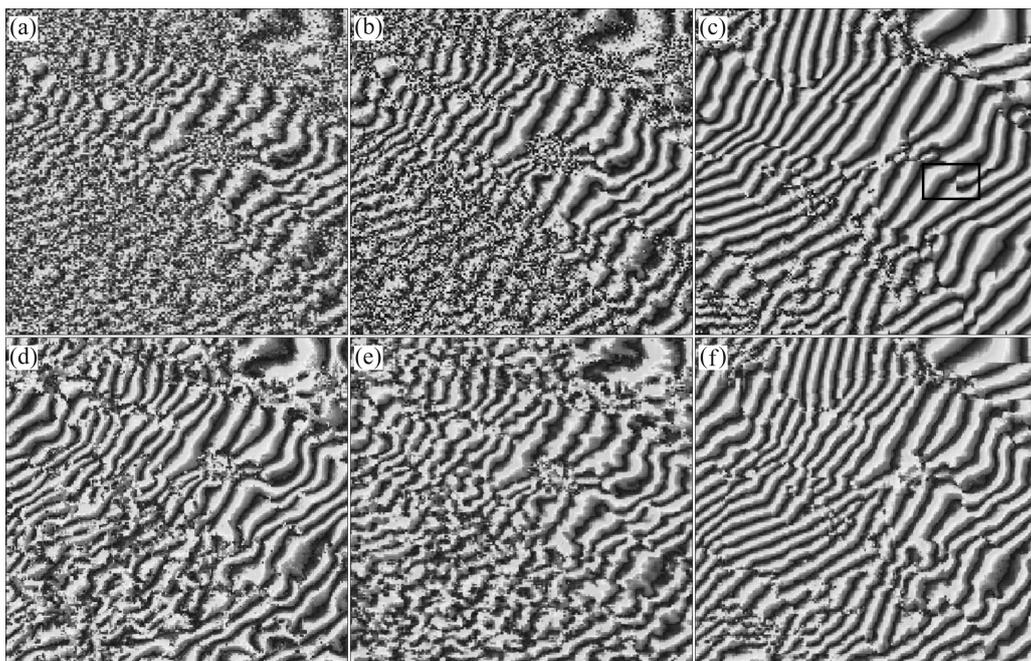


图6 图4中B区滤波结果放大图

Fig. 6 Enlarged filtering results of zone B in Fig. 4: (a) Original phase diagram; (b) Once Goldstein filter; (c) Twice Goldstein filter; (d) Lee filter; (e) Median-adaptive filter; (f) This method

表1 模拟干涉图滤波结果比较

Table 1 Comparison among filtering results of simulated interferogram

Filter	PRPs	NRP	Improvement/%	PSD	SPD	EPI
Simulated phase	0	0	—	$1.21 \times 10^5$	$5.01 \times 10^5$	—
Corrupted phase	16 528	16 525	—	$3.45 \times 10^5$	$8.22 \times 10^5$	1
Once Goldstein	3 935	3 932	76.2	$2.33 \times 10^5$	$6.79 \times 10^5$	0.64
Twice Goldstein	380	380	97.7	$8.70 \times 10^4$	$4.67 \times 10^5$	0.48
Lee	744	743	95.5	$1.51 \times 10^5$	$5.51 \times 10^5$	0.55
Median-adaptive	629	627	96.2	$1.42 \times 10^5$	$5.32 \times 10^5$	0.71
This method	462	463	97.2	$1.28 \times 10^5$	$4.89 \times 10^5$	0.85
Preferable value	Low	Low	High	Low	Low	High

表2 Marini 矿区干涉图滤波结果比较

Table 2 Comparison among filtering results of InSAR interferogram over Marini mining region

Region	Filter	PRPs	NRPs	Improvement/%	PSD	SPD	EPI
A	Original phase	5 104	5 109	—	$8.27 \times 10^4$	$9.92 \times 10^5$	1
	Once Goldstein	1 460	1 461	71.4	$5.69 \times 10^4$	$6.87 \times 10^5$	0.67
	Twice Goldstein	323	330	93.6	$3.91 \times 10^4$	$3.55 \times 10^5$	0.51
	Lee	954	956	81.3	$5.32 \times 10^4$	$4.76 \times 10^5$	0.59
	Median-adaptive	698	701	86.3	$4.25 \times 10^4$	$3.81 \times 10^5$	0.74
	This method	401	395	92.2	$4.06 \times 10^4$	$3.63 \times 10^5$	0.77
	B	Original phase	3 156	3 151	—	$6.92 \times 10^4$	$5.52 \times 10^5$
Once Goldstein		1 025	1 031	67.4	$4.13 \times 10^4$	$3.78 \times 10^5$	0.65
Twice Goldstein		300	299	90.5	$2.86 \times 10^4$	$2.72 \times 10^5$	0.57
Lee		650	649	79.4	$3.52 \times 10^4$	$3.44 \times 10^5$	0.63
Median-adaptive		467	466	85.2	$2.99 \times 10^4$	$2.98 \times 10^5$	0.68
This method		280	281	91.1	$2.48 \times 10^4$	$2.67 \times 10^5$	0.74
Preferable value		Low	Low	High	Low	Low	High

## 4 结论

1) 单次 Goldstein 滤波去噪能力不强, 重复滤波难以保留条纹细节信息。

2) 本研究提出的边缘保持-Goldstein 组合滤波方法结合空域和频域滤波的优点, 运用边缘保持法既进行了初步滤波, 又保护了边缘, 将其结果作为 Goldstein 的输入, 并根据反映其初步结果噪声强度的伪相干值和相位标准偏差来改善 Goldstein 的滤波因子, 使得弱噪区弱滤波, 强噪区强滤波, 滤波强度得到有效调整。

3) 用模拟数据和真实数据对经典的 Goldstein、Lee、中值-自适应方法和本文作者提出的新方法进行对比研究表明, 无论从目视解译还是定量指标评价, 边缘保持-Goldstein 组合滤波法优于其他方法。模拟图和真实图的残余点数去除率均达到 90% 以上, 在真实图的强噪区甚至高于二次 Goldstein, 而表示条纹细节的边缘保持指数达到 0.74, 高于其他方法的。此法在去噪和条纹细节保持之间能得到更好的平衡, 具有更强的局部自适应能力。

## REFERENCES

[1] 陈国洪, 刘云华, 单新建. PSInSAR 技术在北京采空塌陷区地表形变测量中的应用探析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(2): 59-63.

CHEN Guo-hu, LIU Yun-hua, SHAN Xin-jian. Application of PSInSAR technique in the deformation monitoring in mining collapse areas in Beijing[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(2): 59-63.

[2] 朱建军, 邢学敏, 胡俊, 李志伟. 利用 InSAR 技术监测矿区地表形变[J]. 有色金属学报, 2011, 21(10): 2564-2575.

ZHU Jian-jun, XING Xue-min, HU Jun, LI Zhi-wei. Monitoring of ground surface deformation in mining area with InSAR technique[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2564-2575.

[3] 李陶. 重复轨道星载 SAR 差分干涉监测地表形变研究[D]. 武汉: 武汉大学测绘学院, 2004: 37-45.

LI Tao. Study on surface deformation monitoring by repeat pass spaceborne SAR differential interferograms [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004: 37-45.

[4] 廖明生, 林瑛. 雷达干涉测量—原理与信号处理基础[M]. 北京: 测绘出版社, 2003: 84-103.

LIAO Ming-sheng, LIN Hui. Synthetic aperture radar interferometry—Principle and signal processing[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2003: 84-103.

[5] GOLDSTEIN R M, WERNER C L. Radar interferogram filtering for geophysical application[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(21): 4035-4038.

[6] LI Zhi-wei, DING Xiao-li, HUANG Chen, ZHU Jian-jun, CHEN Yan-li. Improved filtering parameter determination for the Goldstein radar interferogram filter[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2008, 63: 621-634.

[7] 孙倩, 朱建军, 李志伟, 尹宏杰. 基于信噪比的 InSAR 干涉图自适应滤波[J]. 测绘学报, 2009, 38(5): 437-442.

SUN Qian, ZHU Jian-jun, LI Zhi-wei, YIN Hong-jie. A new adaptive InSAR interferogram filter based on SNR[J]. Acta

- Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(5): 437-442.
- [8] 于晓歆, 杨红磊, 彭军还. 一种改进的 Goldstein InSAR 干涉图滤波算法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, 36(9): 1051-1054.  
YU Xiao-xin, YANG Hong-lei, PENG Jun-huan. A modified Goldstein algorithm for InSAR interferogram filtering[J]. Journal of Wuhan University: Geomatics and Information Science, 2011, 36(9): 1051-1054.
- [9] 靳国旺, 韩晓丁, 贾博, 李豪. InSAR干涉图的矢量分离式小波滤波[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 33(2): 132-135.  
JIN Guo-wang, HAN Xiao-ding, JIA Bo, LI Hao. Filtering for InSAR interferograms by vector decomposing and wavelet transformation[J]. Journal of Wuhan University: Geomatics and Information Science, 2008, 33(2): 132-135.
- [10] 汪鲁才, 王耀南, 毛六平. 基于小波变换和中值滤波的InSAR干涉图滤波方法[J]. 测绘学报, 2005, 34(2): 108-112.  
WANG Lu-cai, WANG Yao-nan, MAO Liu-ping. An algorithm of interferometric phase filter of InSAR based on wavelet analysis and median filter algorithm[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2005, 34(2): 108-112.
- [11] 蔡国林, 李永树, 刘国祥. 小波-维纳组合滤波算法及其在InSAR干涉图去噪中的应用[J]. 遥感学报, 2009, 13(1): 129-136.  
CAI Guo-lin, LI Yong-shu, LIU Guo-xiang. Wavelet-Wiener combined filter and its application on InSAR interferogram[J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(1): 129-136.
- [12] LOFFELD O, NIES H, KNEDLIK S, WANG Y. Phase unwrapping for SAR interferometry—A data fusion approach by Kalman filtering[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(4): 1197-1211.
- [13] MARTINEZ-ESPLA J J, MARTINEZ-MARIN T, LOPEZ-SANCHEZ J M. Using a grid-based filter approach to solve InSAR phase unwrapping[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letter, 2008, 5(2): 147-151.
- [14] LEE J S, PAPATHANASSIOU K P, AINSWORTH T L, GRUNE S M R, REIGBER A. A new techniques for noise filtering of SAR interferogram phase images[J]. IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1456-1465.
- [15] MASHALY A S, ABDELKAWY E E F, MAHMOUD T A. Speckle noise reduction in SAR images using adaptive morphological filter[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications ISDA 2010. New York: IEEE, 2010: 260-265.
- [16] 尹宏杰, 李志伟, 丁晓利, 蒋弥, 孙倩, 王平. InSAR干涉图最优化方向融合滤波[J]. 遥感学报, 2009, 13(6): 1099-1105.  
YIN Hong-jie, LI Zhi-wei, DING Xiao-li, JIANG Mi, SUN Qian, WANG Ping. Optimal integration-based adaptive direction filter for InSAR interferogram[J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(6): 1099-1105.
- [17] BUEMI M E, JACOBO J, MEJAIL M. SAR image processing using adaptive stack filter[J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31(4): 307-314.
- [18] MARTINEZ-ESPLA J J, MARTINEZ-MARIN T, LOPEZ-SANCHEZ J M. An optimized algorithm for InSAR phase unwrapping based on particle filtering, matrix pencil, and region-growing techniques[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(4): 835-839.
- [19] LOPEZ-MARTINEZ C, FABREGAS X, PIPIA L. Forest parameter estimation in the Pol-InSAR context employing the multiplicative-additive speckle noise model[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2011, 66(5): 597-607.
- [20] 廖明生, 林琤, 张祖勋, 杨文. InSAR干涉条纹图的复数空间自适应滤波[J]. 遥感学报, 2003, 7(2): 98-105.  
LIAO Ming-sheng, LIN Hui, ZHANG Zu-xun, YANG Wen. Adaptive algorithm for filtering interferometric phase noise[J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(2): 98-105.
- [21] YU Qi-feng, YANG Xia, FU Si-hua, LIU Xiao-lin, SUN Xiang-yi. An adaptive contoured window filter for interferometric synthetic aperture radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(1): 23-26.
- [22] 王兴旺, 易辉伟, 朱建军, 张长书, 胡俊. 基于有选择保边缘平滑法的InSAR干涉图像滤波算法[J]. 工程勘察, 2008(11): 50-53.  
WANG Xing-wang, YI Hui-wei, ZHU Jian-jun, ZHANG Chang-shu, HU Jun. A new phase noise reduction for InSAR interferogram based on edge-preservation smoother[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2008(11): 50-53.
- [23] BARAN L, STEWART M P, KAMPES B M, PERSKI Z, LILI P. A modification to the Goldstein radar interferogram filter[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(9): 2114-2118.
- [24] GHIGLIA D C, PRITT M D. Two-dimensional phase unwrapping: Theory, algorithms, and software[M]. New York: John Wiley & Sons, 1998: 53-102.

(编辑 陈卫萍)