

InSAR 干涉图滤波方法对比

赵 诣, 蒋 弥, 杨 川, 钱伯至

(河海大学 地球科学与工程学院, 南京 210000)

摘 要: 针对不同滤波算法在 InSAR 数据处理中去噪效果的差异, 该文从滤波理论出发, 采用模拟和真实干涉数据进行实验。在各种滤波算法中, 均值滤波(多视处理)、Goldstein 滤波及其变种滤波应用广泛, 本文对 4 种滤波方法进行了系统分析, 深入探讨了经典 InSAR 滤波和国内外学者算法的优缺点。实验表明: 4 种滤波均能有效抑制噪声, 提升干涉图质量。其中, Goldstein 滤波以及两种改进的滤波效果要明显优于均值滤波, 且具有更好的自适应性或条纹保持能力, 较经典 Goldstein 滤波而言, 变种滤波方法不仅保持了 Goldstein 滤波的优点, 在边缘信息和细节保持能力方面优势更加显著。

关键词: InSAR; 相位噪声; 相位滤波; 相干性

【中图分类号】P237

【文献标志码】A

【文章编号】1009-2307(2017)06-0149-06

DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2017.06.026

Comparision between filtering methods for InSAR interferogram

Abstract: Aiming at different filtering algorithms' effects of denoising in the processing of the synthetic aperture radar interferometry(InSAR) data, based on the filtering theory the analysis was carried out by using the simulation and the real interferometric data. Among various filtering methods, mean filter(multilook processing), Goldstein filter and its corresponding modified methods were widely used. The advantages and disadvantages of the classical InSAR filter and the domestic and foreign researchers' algorithms were studied in this paper as well. The experimental results showed that four filters could suppress the noise and improve the quality of interference effectively. Among them, the Goldstein filter and its variants acted better than the mean filter significantly, and had better adaptive or the ability to maintain the stripe, compared with the classical Goldstein filtering. And the modified methods not only keep the advantages of Goldstein filter, but also have more significant advantages in the edge information and fine pitch.

Keywords: InSAR; phase noise; phase filter; coherence

ZHAO Yi, JIANG Mi, YANG Chuan, QIAN Bozhi (School of Earth Science and engineering, Hohai University, Nanjing 210000, China)

0 引言

合成孔径雷达干涉测量(synthetic aperture radar interferometry, InSAR)是近 30 年发展起来的

空间对地观测技术, 是传统 SAR 遥感技术与射电天文干涉技术相结合的产物^[1]。它利用雷达向目标区域发射并接收到的微波信号, 通过一系列干涉处理来获取高精度的地面数字高程模型(DEM)以及地面的微小变化。由于其全天候、全天时、高分辨率、高精度和数据处理高自动化等特点, InSAR 在对地观测领域具有广阔的应用前景。

受时间失相关、几何失相关、多普勒中心频率失相关和热噪声等失相关的影响^[2-4], 获取的干涉图表面含有随机噪声, 严重时甚至淹没干涉条纹。这一问题对最终干涉产品精度有着深远的影响。用来提升干涉图质量的方法有很多, 例如文献 [5] 提出了一种基于干涉条纹方向的最优噪声抑制算法, 在边缘保持方面能力突出; 文献 [6] 构造出了一种小波—维纳组合滤波器在保护边缘



作者简介: 赵诣(1995—), 男, 江苏扬州人, 本科, 主要研究方向为大地测量学与测量工程、SAR 影像处理及应用。

E-mail: 1178645635@qq.com

收稿日期: 2015-11-17

基金项目: 地理国情监测国家测绘地理信息局重点实验室开放基金项目(2015NGCM); 中央高校基本科研业务费专项(2014B38914)

通信作者: 蒋弥 E-mail: mijiang@hhu.edu.cn

信息和提升精度方面有显著效果;文献 [7] 改进了 Lee 滤波算法,提升运算速度。在这些滤波优化算法之中,Goldstein 滤波是一种较为经典的频域滤波算法。它具有滤波速度快、计算复杂度低等特点,因而被国际上许多 InSAR 商业软件广泛应用。在此之上,还衍生出一些 Goldstein 变种算法,旨在增强自适应性,保留干涉图细节特征,例如基于相干性的 Baran 滤波^[8]和 Zhao 滤波^[9]等。虽然上述方法能够不同程度地改善干涉图质量并抑制噪声水平,但由于干涉条纹特征十分复杂,通用滤波器在不同干涉图中的效果和实用性有待进一步评估。为此,本文对几种常用或最新研究成果进行系统评估,量化这些方法的优缺点。

1 滤波方法回顾

本文将着重比较经典多视滤波(均值滤波)、经典 Goldstein 滤波、Baran 滤波以及 Zhao 滤波。

1.1 均值滤波

均值滤波是最常用的线性平滑滤波器。该算法的基本思想是用几个像素灰度的平均值来代替每个像素的灰度,实际操作中会以当前点为中心选取一个 $L \times K$ 的小窗口(通常取 3 像素 \times 3 像素或者 5 像素 \times 5 像素来减少图像分辨率损失),从左上角开始在图像上滑动至最后,表示为式(1)。

$$\bar{\phi}(m,n) = \sum_{l=-\frac{L-1}{2}}^{\frac{L-1}{2}} \sum_{k=-\frac{K-1}{2}}^{\frac{K-1}{2}} \phi(m+l,n+k)/KL \quad (1)$$

式中: $\bar{\phi}(m,n)$ 是滤波处理之后的相位值; $\phi(m+l,n+k)$ 为原始相位值; L 、 K 分别为滑动窗口的行数和列数; m 、 n 分别为滑动窗口中心像元的行数和列数。

由于干涉图的缠绕特性,为了避免滤波在相位跳变处引起错误,本文通过复数变换进行复数域滤波,如式(2)。

$$\bar{\phi}(m,n) = \arg \left[\sum_{l=-\frac{L-1}{2}}^{\frac{L-1}{2}} \sum_{k=-\frac{K-1}{2}}^{\frac{K-1}{2}} \exp(j \cdot \phi(m+l,n+k)) \right] \quad (2)$$

式中: $\arg(\cdot)$ 为求复数相位角运算。

1.2 Goldstein 滤波

Goldstein 滤波是 Goldstein 和 Werner 在 1998 年提出的一种干涉图自适应滤波的方法^[10]。该算法利用傅里叶变换将干涉图从空间域转换到频率域,把干涉图分割成重叠的滑动窗口,然后对每个窗口的功率谱进行平滑处理,如式(3)。

$$H(u,v) = S\{|Z(u,v)|\}^\alpha Z(u,v) \quad (3)$$

式中: α 为滤波因子; $S\{\cdot\}$ 为平滑算子; $Z(u,v)$ 为待处理图像; $H(u,v)$ 为滤波后图像; u 、 v 为空间频率。滤波因子最小取 0,此时没有滤波效果,最大取值为 1,此时滤波效果最强。滤波因子取值为经验值, $\alpha=0.5$ 是较为普遍的取值。

1.3 Baran 滤波

由于干涉图的条纹特征和噪声等级不同,Goldstein 滤波在实际应用过程中易产生高滤或者低滤现象,即滤波强度未根据噪声分布的变化而变化。因此当滤波因子 α 取较高的值时,干涉信号会严重丢失;取值较低,又会造成噪声难以彻底消除。考虑到干涉相干性是反映干涉图噪声水平的定量指标^[11],澳洲科廷理工大学的 Baran 等人对滤波因子进行了改进,如式(4)。

$$\alpha = 1 - \bar{\gamma} \quad (4)$$

式中: $\bar{\gamma}$ 为有效窗口(通常取 32 像素 \times 32 像素大小的滑动窗口)的相干值,式(4)的基本原理是当相干性较低时,暗示干涉噪声强,采用更大的 α 值抑制噪声;当干涉性较高时,表明干涉噪声弱,则采用更小的 α 值削弱滤波作用,维持干涉信号。因此,较经典 Goldstein 滤波而言,Baran 滤波更加灵活,细节保持性更强。

1.4 Zhao 滤波

虽然相干性是干涉图质量的指示器,但是估计的相干系数是有偏的^[12],导致滤波指数总是被低估。为避免高偏差,文献 [9] 提出了一种自适应 Goldstein 滤波方法(命名为 Zhao 滤波),该方法通过计算待滤波干涉图的伪相干系数 \bar{P}_c 来定义滤波参数 α 的大小,其公式如式(5)。

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_c &= \frac{\left| \sum_{i=1}^N \varphi_i \right|}{\sum_{i=1}^N |\varphi_i|} \\ \alpha &= 1 - \bar{P}_c \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: N 为滑动滤波窗口内像素总数; φ_i 为干涉复数相位值; \bar{P}_c 为滤波窗口内伪相干系数的均值。可以看出,Zhao 滤波与 Baran 滤波具有相同的原理,只是改变了相位指示器的估计量。文献 [9] 认为当干涉图噪声较强时一般需要进行多次迭代滤波处理。

2 滤波评价指标

常见的图像质量评价方法分为客观和主观两种。主观评价是通过采用目视解译评价图像的质量,客观评价是指提出某个或者某些参数或指标

来描述图像质量。主观判断主要看噪声的抑制效果和相位分辨率的变化, 常用的分析方法主要有剖面法和定量评价指标方法, 当滤波效果差别不大时, 目视法很难判断滤波方法的优劣, 剖面法具有局限性不能代表整幅图像, 需要进行定量信息, 本文选取以下因子作为评价指标^[13]。

2.1 相位标准偏差

相位标准偏差 (phase standard deviation, PSD) 因子反映相位平滑度, 偏差越小相位越平滑, 计算公式为式(6)。

$$PSD = \sum \left[\frac{\sum (\varphi(m, n) - \bar{\varphi}(m, n))^2}{N-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中: $\varphi(m, n)$ 是干涉图相位值; $\bar{\varphi}(m, n)$ 是所选滑动窗口干涉图相位值的平均值。N 是滑动窗口像元个数。

2.2 均方根误差

均方根误差 (root-mean-square error, RMS) 因子以原始不加噪声的干涉图作为底图, 来计算滤波后图像和原始图像的相位偏差, 误差越小代

表滤波器的保真性越好。计算公式为式(7)。

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum (\phi_s(m, n) - \phi_0(m, n))^2}{N-1}} \quad (7)$$

式中: $\phi_s(m, n)$ 是滤波后的相位值; $\phi_0(m, n)$ 是参考干涉图相位值。

2.3 相位奇异点

奇异点 (residue point number) 是指干涉图相邻 4 个像元梯度按某一方向积分值不为 0 的点。减少相位解缠中的粗差是干涉图滤波的主要目的, 相位奇异点过多会影响滤波结果的稳定性和可靠性, 因此奇异点的数量是评价滤波结果的重要指标^[14]。

2.4 边缘保持指数

边缘保持指数 (edge preservation index, EPI) 因子反映滤波结果的边缘信息的保持能力, 由于是和数的比值, 这样就能减弱噪声的影响。该指标越接近于 1, 表示滤波处理图像和原始图像在保持边缘信息上越接近^[15]。只要样本数足够多, 就能够精确描述边缘梯度。计算公式为式(8)。

$$EPI = \frac{\sum (|\phi_s(m, n) - \phi_s(m+1, n)| + |\phi_s(m, n) - \phi_s(m, n+1)|)}{\sum (|\phi_0(m, n) - \phi_0(m+1, n)| + |\phi_0(m, n) - \phi_0(m, n+1)|)} \quad (8)$$

实际的计算中, 在相位跳变点采用加减 2π 的方法来消除因相位跳变而产生的计算误差。在均方误差计算中, 采用了同样的方法。明显看出边缘保持系数(EPI)和均方根误差(RMS)是针对模拟的干涉相位图而言, 因此本文使用这两个因子对模拟相位图进行评价。

3 结果分析及精度评估

3.1 模拟数据实验

为了比较几种滤波器的效果, 本文采用分形技术^[16]模拟出大小为 500 像素 × 500 像素的无噪

声相位干涉图(图 1(a)), 根据时空间相关相关模型模拟出相干值信息, 通过相干值计算出相对应的标准差(图 1(b)), 最后进行相位缠绕加入噪声, 图 1(c)为加噪声的模拟干涉。

图 2(a)~图 2(d)分别为均值滤波、Goldstein 滤波、Baran 滤波、Zhao 滤波后的影像。均值滤波的滑动窗口大小为 5 像素 × 5 像素; Goldstein 滤波所选滤波参数为 0.5; Baran 滤波参数由相干值决定, 窗口大小为 32 像素 × 32 像素, 重叠像素为 14; Zhao 滤波采用同样的窗口大小, 迭代次数为两次^[12]。图 3 为 4 种滤波结果在边缘区域 A 的横断面图。

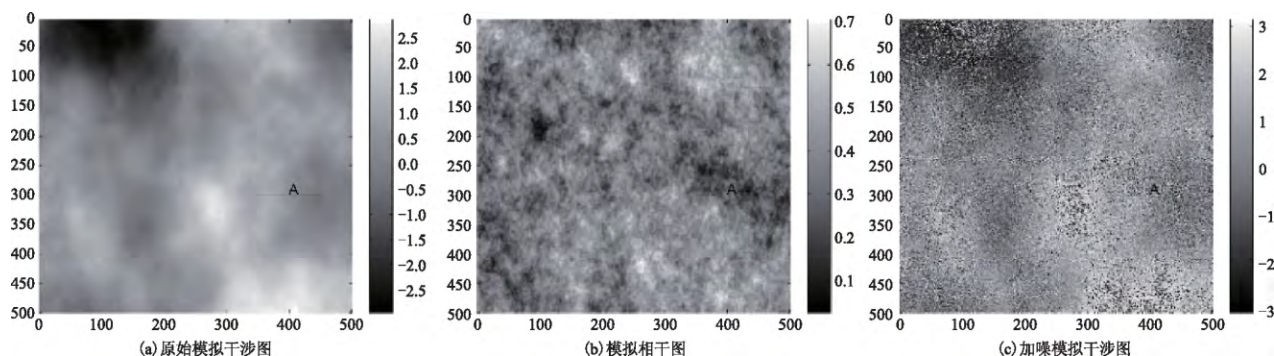


图 1 模拟结果

Fig 1 Results of Simulated Images

定性地看, 图 2(b)~图 2(d)效果明显优于图 2(a), 均值滤波虽然能改善图像质量, 但分辨

率衰减和残差仍然存在, 淹没了原始信号的条纹信息; Goldstein 滤波、Baran 滤波、Zhao 滤波处

理的图像与原干涉图更为相近。从图 3 可以看出，在边缘部分，相比于其余几种滤波，Goldstein 滤波存在较多噪声，Baran 滤波、Zhao 滤波在边缘处理的较为平滑，更加接近原始图像，两种变种滤波都表现出了良好的去噪能力。

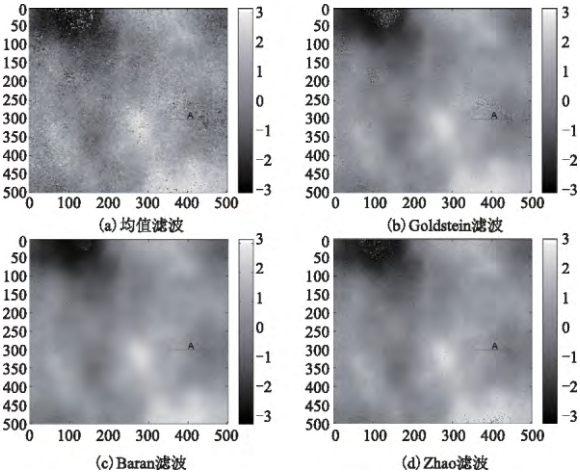


图 2 模拟数据滤波实验结果
Fig 2 Results of Simulated Data Filtering Experiment

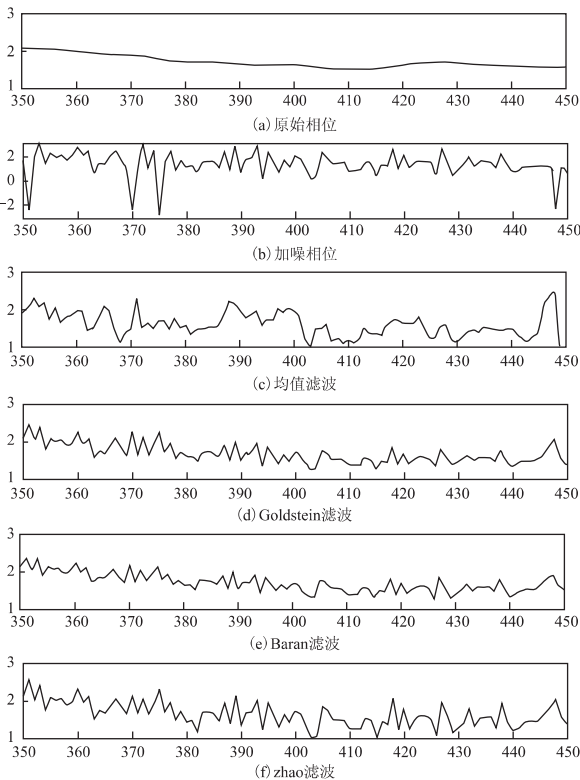


图 3 模拟数据滤波结果局部横断面
Fig 3 Profile of Simulated Data Filtering Results

定量地看，本文进一步引入相位标准差、均方误差、边缘保持指数因子，对结果进行比较，结果如表 1 所示。整体上，所有滤波方法均有抑制噪声的能力，这可以从 PSD 上得到验证，而自适应滤波方法（如 Zhao 滤波和 Baran 滤波要优于经

典均值滤波和 Goldstein 滤波。特别是在细节保留方面优势更加突出。在 RMS 统计上，Baran 滤波的 RMS 指标数值最小，相比于 Goldstein 滤波和 Zhao 滤波，Baran 滤波分别高出了 48% 和 38%，这表明 Baran 滤波后的影像与原始图像的差异最小，保真性能更强。然而在 EPI 指标上，Zhao 滤波的结果远远优于其余 3 种滤波，仅为 0.997 5，而 Goldstein 滤波边缘保持指数最大，比均值滤波和 Baran 滤波分别高出了 28% 和 40%，从这里可以看出，Zhao 滤波边缘保持能力最强，Goldstein 滤波牺牲了较多的边缘信息。值得注意的是，虽然改进的两种滤波在保真性和边缘保持能力方面分别取得了较大突破，但是仍没有一种滤波方法可以胜任所有的指标。最优滤波器应该服从于干涉图局部特征的需求。

表 1 模拟相位图滤波效果评价表

Tah 1 Effect Evaluation of Simulated Phase Diagram			
滤波方法	相位标准差	均方根误差/rad	边缘保持指数
加噪干涉图	2.5763×10^6	1.307 9	81.102 9
均值滤波	6.5995×10^5	0.543 3	18.240 6
Zhao 滤波	7.3306×10^5	0.371 9	0.997 5
Goldstein 滤波	8.0131×10^5	0.448 6	25.205 5
Baran 滤波	4.8115×10^5	0.232 4	15.128 4

3.2 真实数据实验

本文选取美国夏威夷火山区域的 ASAR 数据进行真实数据测试，其垂直基线为 190 870 m。该区域相位细节较为丰富，便于对比分析。图 4(a)~图 4(b)分别为原始干涉图和相干图。

图 5(a)~图 5(d)分别为均值滤波、Goldstein 滤波、Baran 滤波以及 Zhao 滤波结果。4 种滤波器采用模拟实验配置。

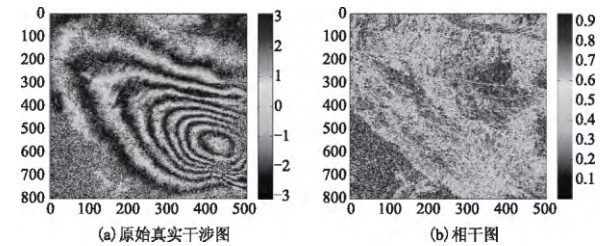


图 4 研究区域影像
Fig 4 Image of Study Area

从整体效果上来看，4 种滤波器不同程度地抑制了噪声，提升了影像质量。3 种自适应滤波结果明显好于均值滤波，在边缘信息保持能力方面体现了自适应滤波的优越性。均值滤波之后的影像虽然抑制了噪声，但是不能达到满意的效果，仍存在大量噪声，条纹被噪声淹没，边缘信息丢失

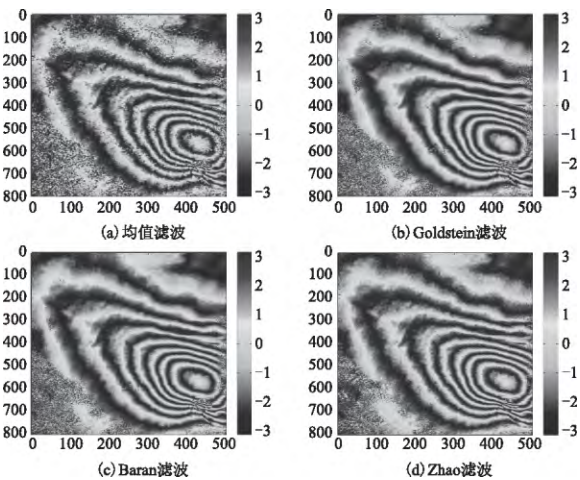


图 5 真实数据滤波结果
Fig 5 Results of Real Data Filtering

严重, 与模拟实验结果相同; Goldstein 滤波和 Baran 滤波在边缘处都有信息丢失, 而 Zhao 滤波对边缘信息保留的更加完整。3 种自适应滤波处理结果较为相近, 若要进一步进行比较, 需要进一步引入因子进行定量分析。表 2 为真实相位图滤波效果评价表。

从表 2 可以看出, 均值滤波的 PSD 最小, 比 3 种自适应滤波的 PSD 低了约 11%, 表明平滑程度最高; 在相位奇异点减少率上, Zhao 滤波的减少率最高为 87.3%, 这主要是因为二次滤波进一步减小了相位残差。而本例中 Goldstein 滤波的减少率最低仅为 67.1%。这一现象表明 4 种滤波器均较大程度地提升了图像的平滑度, 减少了奇异点。虽然均值滤波平滑度高, 但保真性较差, Baran 滤波和 Zhao 滤波继承了 Goldstein 滤波的优点, 在抑制噪声的同时尽量维持图像分辨率, 因而更加有利于 InSAR 后续处理数据的稳定性和可靠性。总体上, 本文介绍的 4 种滤波在某些方面能够取得显著效果, 但都无法胜任所有定量指标, 所以实际应用中需要结合滤波需求选择滤波器种类。

表 2 真实相位图滤波效果评价表
Tab 2 Effect Evaluation of Real Phase Diagram

滤波方法	相位 标准差	相位奇 异点数	奇异点 减少率/(%)	运算 时间/s
原始干涉图	4.3945×10^6	35 601		
均值滤波	1.9171×10^6	5 862	83.5	1.98
Goldstein 滤波	2.0926×10^6	11 742	67.1	13.35
Baran 滤波	2.0937×10^6	9 032	74.6	13.54
Zhao 滤波	2.2509×10^6	4 521	87.3	24.03

最后, 从计算效率来看, 本实验均在 Intel Core i5-4200 CPU 处理器, Matlab2012 版本上执

行。对于 500 像素 \times 500 像素大小的影像, 均值滤波耗时 1.98 s, Goldstein 滤波耗时 13.35 s, Baran 滤波耗时 13.54 s, Zhao 滤波耗时 24.03 s。由于算法较复杂, 并伴随迭代处理, 所以 3 种自适应滤波运算时间远大于均值滤波。

4 结束语

本文介绍了当前国际上常用的 4 种 InSAR 干涉图滤波算法, 它们分别是均值滤波、经典 Goldstein 滤波、基于相干性的 Baran 滤波和基于伪相干性的 Zhao 滤波。采用模拟和真实数据, 在定量的对比分析之上评价了这些方法的优缺点。实验结果表明, 4 种常用滤波均能抑制噪声干扰, 改善干涉图质量, 但是没有一种方法是最优的。一般地, 均值滤波和经典 Goldstein 滤波效果要弱于改进的自适应 Goldstein 滤波方法, 特别是在维持影像细节方面。由于增加了判断噪声等级的因子, Baran 和 Zhao 滤波具有更好的保真性和边缘保持能力。然而, 每个干涉图在噪声和条纹分布上均有不同特征, 没有一种滤波器可以胜任所有滤波指标。因此, 采用何种滤波方法应取决于研究对象和科研人员注重的评价指标。

参考文献

[1] 何儒云, 王耀南, 毛建旭. 合成孔径雷达干涉测量(InSAR)关键技术研究[J]. 测绘工程, 2007, 16(5): 53-56. (HE Ruyun, WANG Yaonan, MAO Jianxu. Study on interferometric synthetic aperture radar(InSAR) technology[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2007, 16(5): 53-56.)

[2] 游新兆, 王琪, 乔学军, 等. 大气折射对 InSAR 影响的定量分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(2): 81-87. (YOU Xinzhaoh, WANG Qi, QIAO Xuejun, et al. Quantitative estimation of effect of atmospheric refraction on InSAR[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2003, 23(2): 81-87.)

[3] 张景发, 李发祥, 刘钊. 差分 InSAR 处理及其应用分析[J]. 地球信息科学, 2000, 2(3): 58-64. (ZHANG Jingfa, LI Faxiang, LIU Zhao. The processing procedure of D-InSAR and influence factors of its application[J]. Geo-information Science, 2000, 2(3): 58-64.)

[4] 刘晓萌, 常占强, 张景发, 等. D-InSAR 处理中失相干问题的研究[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2007, 31(2): 260-263. (LIU Xiaomeng, CHANG Zhanqiang, ZHANG Jingfa, et al. Investigation on decorrelation in processing of D-InSAR[J]. Journal of Hebei Normal University(Natural Science Edition), 2007, 31(2): 260-263.)

- [5] 尹宏杰,李志伟,丁晓利,等. InSAR 干涉图最优化方向融合滤波[J]. 遥感学报, 2009, 13(6): 1092-1105. (YIN Hongjie, LI Zhiwei, DING Xiaoli, et al. Optimal integration-based adaptive direction filter for InSAR interferogram[J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(6): 1092-1105.)
- [6] 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 Guolin, LI Yongshu, LIU Guoxiang. Wavelet-wiener combined filter and its application on InSAR interfereogram[J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(1): 129-136.)
- [7] 刘璐,陈永强. 改进的 InSAR 相位 Lee 滤波器[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(19): 5668-5672. (LIU Lu, CHEN Yongqiang. Modified InSAR phase Lee filter[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(19): 5668-5672.)
- [8] 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, 41(9): 2114-2118.
- [9] ZHAO Chaoying, ZHANG Qin, DING Xiaoli, et al. An iterative goldstein SAR interferogram filter[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(11): 3443-3455.
- [10] GOLDSTEIN R M, WERNER C L. Radar interferogram filtering for geophysical applications[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(21): 4035-4038.
- [11] 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(7): 3002-3010.
- [12] JIANG M, DING X, LI Z. Hybrid approach for unbiased coherence estimation for multitemporal InSAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(5): 2459-2473.
- [13] 尹宏杰. 基于 InSAR 的矿区地表形变监测研究[D]. 长沙:中南大学, 2009. (YIN Hongjie. Ground subsidence monitoring in mining area using InSAR [D]. Changsha: Central South University, 2009.)
- [14] 廖明生,林琨,张祖勋,等. INSAR 干涉条纹图的复数空间自适应滤波[J]. 遥感学报, 2004, 7(2): 98-105. (LIAO Mingsheng, LIN Hui, ZHANG Zuxun, et al. Adaptive algorithm for filtering interferometric phase noise[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 7(2): 98-105.)
- [15] 韩春明,郭华东,王长林,等. 保持边缘的 SAR 图像滤波方法[J]. 高技术通讯, 2003, 13(7): 11-15. (HAN Chunming, GUO Huadong, WANG Changlin, et al. Edge-preserving filter for SAR images[J]. High Technology Letters, 2003, 13(7): 11-15.)
- [16] HANSSEN R F. Radar interferometry: data interpretation and error analysis[J]. Journal of the Graduated School of the Chinese Academy of Science, 2001, 2(1): 577-580.

(责任编辑:沈晶)

(上接第 98 页)

- [17] SMALL C. Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(7): 1305-1334.
- [18] POZZI F, SMALL C. Analysis of urban land cover and population density in the United States[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2005, 71(6): 719-726.
- [19] 卓莉,张晓帆,郑璟,等. 基于 EVI 指数的 DMSP/OLS 夜间灯光数据去饱和方法[J]. 地理学报, 2015, 70(8): 1339-1350. (ZHUO Li, ZHANG Xiaofan, ZHENG Jing, et al. An EVI-based method to reduce saturation of DMSP/OLS nighttime light data[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(8): 1339-1350.)
- [20] 米晓楠,白林燕,谭雪航,等. 基于 DMSP/OLS 数据的城市中心城区提取新方法[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(2): 255-261, 279. (MI Xiaonan, BAI Linyan, TAN Xuehang, et al. A new method of extracting areas of center city regions based on DMSP/OLS data [J]. Journal of Geo-Information Science, 2013, 15(2): 255-261, 279.)
- [21] 王晓慧. 基于夜间灯光数据的中国近 30 年城镇扩展研究[D]. 南京:南京大学, 2013. (WANG Xiaohui. Urban expansion in China over the past 30 years detected using DMSP/OLS nighttime light data [D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.)
- [22] 苏泳娴,王重洋,张虹鸥,等. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据提取城镇建设用地的邻域分析法[J]. 热带地理, 2015, 35(2): 193-201. (SU Yongxian, WANG Chongyang, ZHANG Hongou, et al. Neighborhood statistics analysis method for extracting the built-up urban area with DMSP/OLS night light data[J]. Tropical Geography, 2015, 35(2): 193-201.)
- [23] ELVIDGE C D, BAUGH K E, KIHN E A, et al. Relation between satellite observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(6): 1373-1379.

(责任编辑:贾娇)