

## 基于模数的干涉相位自适应中值滤波法

葛仕奇 丁泽刚 陈亮\* 龙腾  
(北京理工大学信息与电子学院 北京 100081)

**摘要:** 为了改善对干涉相位噪声的抑制效果而又确保有用相位跳变信息不被滤除,该文首先研究了模数滤波算法,并提出了一种基于最短子区间搜索的干涉相位模数估计算子对其进行改进,在进一步分析模数估计参数与相位分辨率之间关系的基础上,提出了一种局部相位中心随干涉相位质量自适应变化的中值滤波方法。该方法不仅克服了模数滤波导致的条纹边缘模糊问题,还解决了传统空域滤波进行一致性处理所造成的过滤波和欠滤波问题,而且具有较高的运算效率。最后通过对仿真和实测 TerraSAR-X 数据的处理和分析,验证了该方法的有效性。

**关键词:** 干涉合成孔径雷达; 自适应滤波; 噪声抑制; 模数估计

中图分类号: TN959.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)04-0917-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00860

## A Mode Based Auto-adaptive Median Filtering Method for Interferometric Phase

Ge Shi-qi Ding Ze-gang Chen Liang Long Teng

(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to improve the phase noise reduction effect and to avoid filtering useful phase jumps, this paper first investigates mode filtering algorithm and proposes a modified mode estimator based on shortest sub-interval seeking for interferometric phase. By further analysis of relationship between mode estimating parameter and phase resolution, an auto adaptive local phase center with variation of interferometric phase quality is constructed, based on which an adaptive median filtering method is presented. This method could overcome the edge blur problem caused by mode filter, and is also effective to avoid over filtering or under filtering caused by conventional spatial filter with uniform parameter. Meanwhile, it achieves better computation efficiency. Finally, experiments with simulated and real TerraSAR-X data are performed to testify the effectiveness of this method.

**Key words:** Interferometric SAR; Auto-adaptive filtering; Noise reduction; Mode estimate

### 1 引言

干涉合成孔径雷达(InSAR)采用两幅雷达天线接收地表散射回波,并通过干涉处理来获取高精度的地表高程或形变信息,具有全天时、全天候、高精度和宽测绘带等优点<sup>[1]</sup>。在 InSAR 处理中,干涉相位由经过高精度配准的两幅 SAR 复图像进行共轭相乘得到,其质量高低对相位解缠、高程反演等后续处理影响很大<sup>[2,3]</sup>。而由于系统噪声、雷达阴影等非理想因素的存在,干涉相位往往遭到严重破坏,需要采取适当的滤波方法来改善相位质量。

干涉相位滤波方法主要分三类:空域滤波、频域滤波和时频域滤波。空域滤波的常用方法是多视平均<sup>[4]</sup>,该方法可以有效地滤除斑点噪声并提高干涉图像信噪比,但是会以牺牲空间分辨率为代价,而另一类非线性滤波法<sup>[5]</sup>可以在不牺牲空间分辨率的

前提下取得较好的噪声抑制效果,如模数滤波、中值滤波等,其中模数滤波的噪声抑制能力较强,但会引起相位条纹模糊,而中值滤波是一种常用的边缘保持滤波器,需要确定局部相位中心对滤波结果进行修正。相对于空域滤波,频域或时频域滤波对局部噪声的抑制能力更为突出,典型方法如 Goldstein 滤波<sup>[6]</sup>、基于 DWT 变换的小波滤波<sup>[7]</sup>等,这些方法针对不同频率分量的信号分别处理,不但算法复杂而且计算时间很长,并且可能会引起有用相位跳变信息的损失。随着 InSAR 系统成像分辨率的不断提高,干涉相位所反映的地形变化越来越精细,近年来在空域<sup>[8,9]</sup>、频域<sup>[10,11]</sup>和时频域<sup>[12,13]</sup>提出的新方法,趋向于根据干涉相位的局部特征做自适应处理,滤波的目的不仅要减少残差点数目,而且要保持较高的相位分辨特性,在高精度高程提取中起到的作用越来越重要。

本文首先研究了模数滤波算法,并提出通过最短子区间搜索实现对干涉相位模数的鲁棒估计,在进一步分析模数估计参数与相位分辨率之间关系的

2011-08-21 收到, 2011-11-28 改回

国家自然科学基金(61001189)资助课题

\*通信作者: 陈亮 chenl@bit.edu.cn

基础上,提出了一种基于模数的干涉相位自适应中值滤波方法,并通过仿真和实测数据对该方法进行性能分析和有效性验证。本文使用相位残差点和相位标准偏差(PSD)作为干涉相位质量的评估指标,残差点是指由干涉相位噪声引起的相位不连续点,残差点分布越密集就越不利于相位解缠;而相位标准偏差是由 Goldstein 等人<sup>[6]</sup>首次提出的一种评价相位噪声严重程度的度量标准,PSD 值越小表示干涉相位的连续性越好,相位边缘保持特性也越好。

## 2 模数滤波算法研究及改进

### 2.1 模数滤波

模数是指使随机变量概率密度最大的自变量取值,可以反映随机变量在统计意义上的集中趋势。设在大小为  $N \times N$  的支撑域  $S = \{(i,j); i,j = 1,2,\dots, N\}$  上,存在待滤波的干涉相位场  $p(\cdot)$ ,其相位值分布在  $(-\pi, \pi)$  区间内,定义  $W_T$  为以  $T \equiv (i,j) \in S$  为中心的滤波模板,模板大小为  $M \times M$ ,模板内像素总数为  $W = M \times M$ ,则模数滤波的过程为<sup>[5]</sup>

$$\phi(T) = \text{mode}\{p(T_k); T_k \in W_T \cap S \ \& \ p(T_k) \in \beta_i\} \quad (1)$$

其中  $\text{mode}\{\cdot\}$  即为求模数运算,通常采用如下方法计算:在相位取值区间  $(-\pi, \pi)$  内,划分为  $l$  个子区间,每个子区间长度为  $\beta$ ,第  $i$  个子区间记为  $\beta_i$ ,  $i=1,2,\dots,l$ 。根据区间的划分,对滤波模板  $W_T$  内的采样值统计直方图,模数表示取直方数最大的子区间  $\beta_i$  的中间值。

模数滤波能很好地抑制相位噪声,但是会引起较大的边缘模糊。另外,干涉相位属于周期性连续型随机变量,而由 InSAR 系统获取的观测相位矩阵里的数值为其采样值,由连续型随机变量的采样值求模数,采用直方图统计的方法会存在不足,主要问题是处理速度慢,而且易引起统计误差<sup>[14]</sup>。

### 2.2 模数估计方法的改进

采用统计直方图的方法求模数对于离散型随机变量更为合理,而对连续型随机变量需要根据其随机分布特性采用不同的模数估计算子,如 SPM (Standard Parametric Mode)算子, Grenander 算子, RDM (Robust Direct Mode)算子等<sup>[15]</sup>。干涉信号服从联合圆对称高斯分布,对应的干涉相位概率密度函数具有对称性和周期性的特点,故本文提出基于最短子区间搜索的干涉相位模数估计算子,表述如下:

设在模板  $W_T$  内,干涉相位观测值的集合为  $\{\phi_i\}_{i=1}^W$ ,并且  $\square_1 \leq \square_2 \leq \dots \leq \square_W$ ,对于给定的估计参数  $J$ ,存在大小为  $\{\square_{m+J} - \square_m, m=1,2,\dots, W-J\}$  的判定区间,那么模数估计算子为

$$\left. \begin{aligned} \text{mode}[W_T] &= \frac{1}{J+1} \sum_{i=\hat{m}}^{\hat{m}+J} \phi_i \\ \hat{m} &= \arg \min_m \{(\phi_{m+J} - \phi_m), m=1,2,\dots, W-J\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由于该算子结构简单,其运算效率明显优于直方图统计法。以  $2048 \times 2048$  干涉相位图为例,针对不同大小的滤波模板,以上两种模数估计方法的耗时比较如表 1。

表 1 不同模数估计方法的耗时比较 (s)

估计方法	$M=3$	$M=5$	$M=7$	$M=9$
直方图统计法	628.5	646.8	668.3	693.4
最短子区间搜索法	153.1	158.2	167.2	177.4

进一步分析该算子,参数  $J$  对模数估计结果有如下影响: $J$  取值越小,估计结果的偏差会越小,并且对随机变量的波动变化越敏感,即相位分辨率越高,但可能误将数据中的异常波动当作模数;而  $J$  取值越大,估计结果的方差会越小,并且容易取得更好的平滑效果,但可能造成过度滤波而使结果影像模糊。图 1 为对 ERS-1/2 系统获取的干涉相位的模数估计结果,估计参数  $J$  分别取 6 和 15,实验结果直观反映出了参数  $J$  对模数估计结果的影响。

## 3 基于模数的自适应中值滤波

根据前文对模数估计参数  $J$  与相位分辨率之间关系的分析,同时针对模数滤波易引起相位条纹边缘模糊的缺点,本文提出了一种基于模数的干涉相位自适应中值滤波方法。该方法采用 2.2 节提出的模数估计算子,根据干涉相位质量差异产生不同的参数  $J$  进行模数估计并完成模数滤波,然后将模数滤波结果作为局部相位中心,再进行圆周中值滤波。整个滤波过程表述如下:

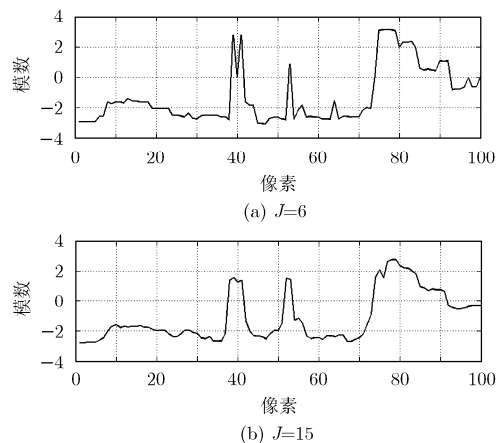


图 1 不同参数下模数估计算子的结果比较

$$\phi(T) = \text{mode}[W_T; J(\bar{\gamma})] +_{2\pi} \text{median}\{(P(F) -_{2\pi} \text{mode}[W_T; J(\bar{\gamma})]), F \in W_T \cap S\} \quad (3)$$

其中 $+_{2\pi}$ 和 $-_{2\pi}$ 分别为“模 $2\pi$ 加”和“模 $2\pi$ 减”运算； $\bar{\gamma}$ 为相位质量因子，其取值范围在 $(0, 1)$ 之间， $\bar{\gamma}$ 越接近于1代表相位质量越好；滤波参数 $J(\bar{\gamma})$ 由式(4)确定。

$$J(\bar{\gamma}) = \left\lfloor (1 - \alpha^{\bar{\gamma}-1}) \cdot (J_{\max} - J_{\min}) + J_{\min} \right\rfloor \quad (4)$$

其中 $\alpha$ 是拉伸系数，典型取值范围是50~150，它决定了滤波参数 $J$ 在不同相干系数下的分布； $J_{\max}$ 、 $J_{\min}$ 与滤波模板大小 $M \times M$ 有关，其取值为

$$\left. \begin{aligned} J_{\max} &= \eta_{\max} \cdot M \cdot M \\ J_{\min} &= \eta_{\min} \cdot M \cdot M \cap J_{\min} \geq 3 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

根据模数估计算子对参数 $J$ 的要求， $\eta_{\max}$ 的取值在0.6~0.7之间，而 $\eta_{\min}$ 的取值在0.1~0.2之间，且 $J_{\min}$ 的取值应当不小于3。

分析式(3)~式(5)，该滤波器的滤波强度随模数估计参数 $J$ 动态改变，而 $J$ 的取值受相位质量因子 $\bar{\gamma}$ 控制，因此滤波效果的好坏取决于 $\bar{\gamma}$ 的选取。根据干涉相位的特点， $\bar{\gamma}$ 的取值应当分两种情况：对于干涉相位质量较差的区域，滤波的首要目的是减少残差点数目，使其达到相位解缠可接受的水平，在此基础上应尽量抑制相位噪声以提高相位精度，因此 $\bar{\gamma}$ 的取值应当同时考虑局部相位的残差点密度 $\rho$ 和相干系数 $\gamma$ ；对于干涉相位质量较好的区域，滤波的目的以抑制相位噪声为主，在这类区域出现的相位残差点往往是由于地形剧烈变化引起的，是高程信息的正确反映，应当在滤波中予以保留，因此 $\bar{\gamma}$ 的取值只考虑干涉相干系数 $\gamma$ 。根据以上分析， $\bar{\gamma}$ 的表达式如下：

$$\bar{\gamma} = \begin{cases} \gamma, & \gamma \geq \gamma_{\text{thresh}} \\ (1 - \sigma) \cdot \gamma + \sigma \cdot (1 - \rho / \rho_{\max}), & \gamma < \gamma_{\text{thresh}} \end{cases} \quad (6)$$

由于在视数一定的情况下，干涉相位分布的标准偏差随 $\gamma$ 增加而减小， $\gamma$ 能够合理反映相位随高程变化的准确程度，故在式(6)中以 $\gamma_{\text{thresh}}$ 作为区分相位质量好坏的门限标准，而 $\sigma$ 是加权系数。图2为对TerraSAR-X重轨干涉条纹，取 $\gamma_{\text{thresh}}=0.8$ ， $\sigma=0.45$ 时某个剖面的干涉相位质量因子生成图，可见对于干涉相位质量较差的区域，由于进一步考虑了局部相位残差点密度的影响， $\bar{\gamma}$ 的选取在减少残差点数目和保持相位精度之间进行了更为合理的折中，有助于相位滤波效果的改善。

此外，将模数滤波结果作为局部相位中心进一步进行中值滤波，不仅能使局部相位中心具有良好的自适应特性，而且可以克服由模数滤波导致的条

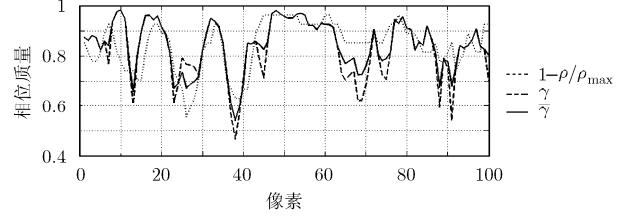


图2 干涉相位质量因子剖面图

纹边缘模糊问题。图3(a)为经过缠绕的线性递增相位，考虑到热噪声、几何去相干和体散射去相干等非理想因素的影响，产生如图3(b)所示的含噪声的干涉相位仿真数据，PSD值为1.3556。分别采用模数滤波和本文提出的滤波方法进行处理，结果如图3(c)、3(d)所示，并进一步给出了各相位图第100列的纵向剖面图。可见，模数滤波已取得较好的噪声抑制效果，但是存在条纹边缘模糊的问题，PSD值仅减小至0.7105；而采用本文提出的方法，不仅进一步抑制了相位噪声，而且使条纹边缘更加清晰，PSD值也进一步减小为0.3593。从相位剖面图看，采用本文提出的滤波方法所得的处理结果，与原始相位基本一致，且在 $\pm\pi$ 附近没有出现相位的异常跳变，很好地适应了干涉相位在 $(-\pi, +\pi]$ 区间内的圆周分布特性。

#### 4 实验结果及分析

实测数据来自TerraSAR-X卫星获取的美国科罗拉多大峡谷地区的两幅SAR单视复图像，数据获取时间分别为2008年3月10日13时32分和2008年3月21日13时32分，图像大小为 $2048 \times 2048$ 。经过复图像配准、去平地之后得到的干涉相位图、残差点分布图和相位质量图分别如图4(a)、4(b)和4(c)所示，滤波前干涉相位受噪声污染比较严重，残差点总数为536509。

为了检验参数 $J$ 对滤波结果产生的影响，实验采用了不同的滤波参数 $J$ 对干涉相位图进行滤波，并统计了滤波后的残差点数目，结果如图5。

可见， $J$ 的取值越大，滤波后的残差点数目越少，干涉相位的噪声抑制能力越强，但是， $J$ 取值过大也会带来过度滤波的问题。下面分别取 $J=10$ 和 $J=50$ 对原干涉相位图进行滤波处理，图6为经过放大的滤波结果局部区域，可以看到参数 $J$ 取值过大会使相位图过度平滑，这对于相位质量较好的区域反而会导致相位分辨率降低。

因此，采用本文提出的自适应滤波方法，根据干涉相位质量选取不同的参数 $J$ 进行滤波处理更为合理，图7分别给出了采用该方法得到的滤波结果、

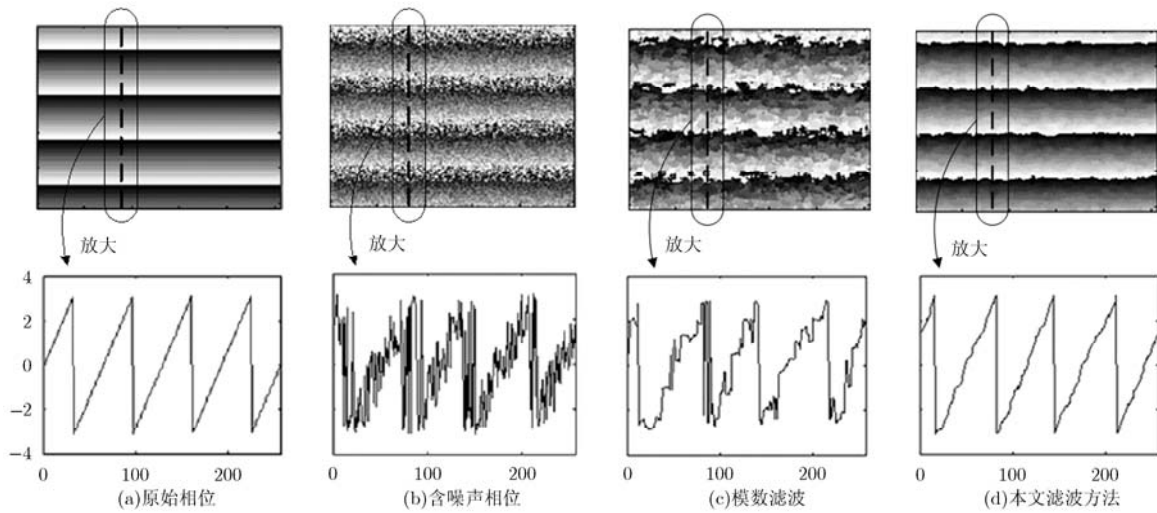
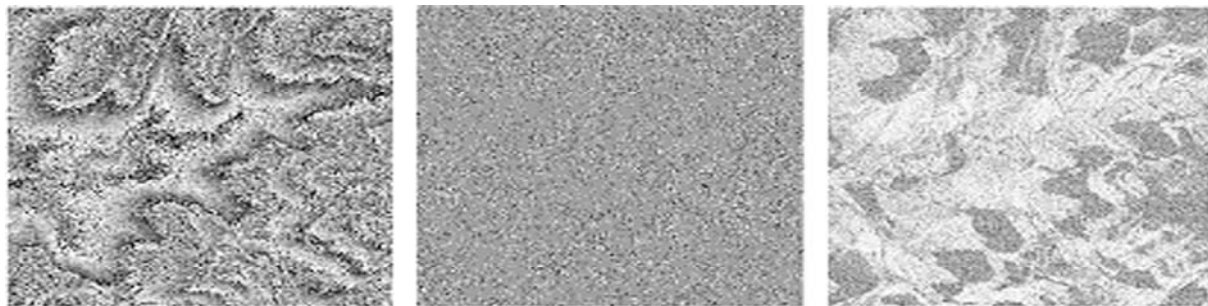


图 3 不同滤波方法处理结果对比



(a)原始相位图

(b)残差点分布图

(c)相位质量图

图 4 滤波前干涉相位及对应的残差点分布图与相位质量图

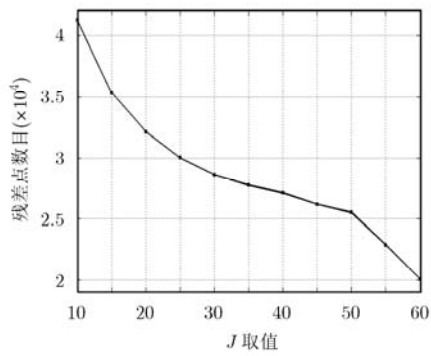
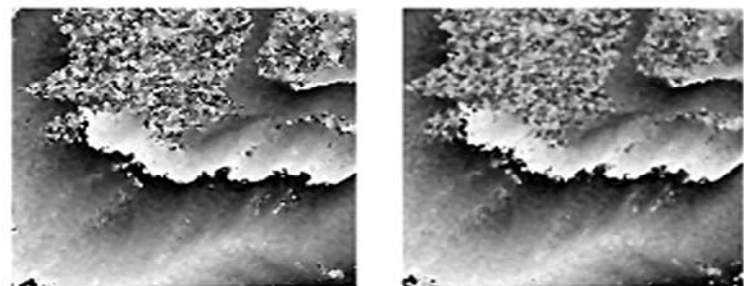


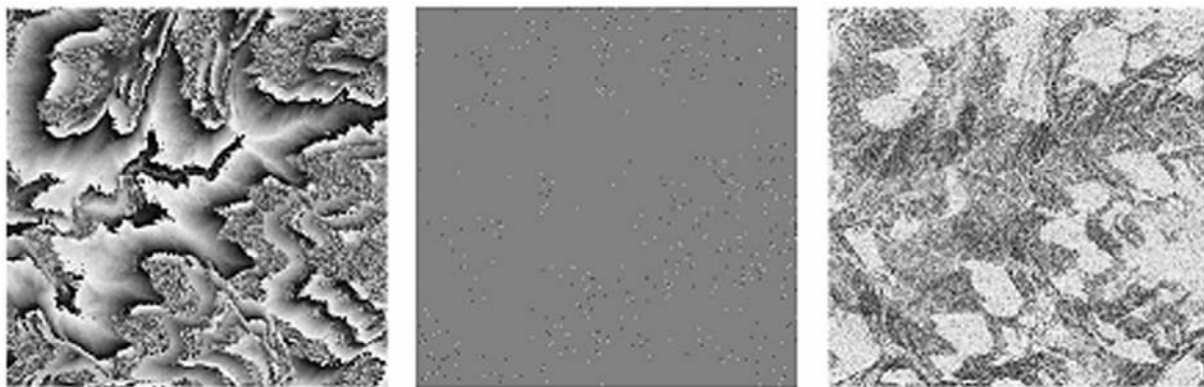
图 5 滤波后残差点数目随参数  $J$  取值的变化曲线



(a)  $J=10$

(b)  $J=50$

图 6 不同滤波参数  $J$  的滤波结果对比



(a)本文滤波结果

(b)残差点分布图

(c)  $J$  取值图

图 7 本文方法的相位滤波结果及对应的残差点分布图和  $J$  取值图

残差点分布图和  $J$  取值图。对比分析图 7(c) 的  $J$  取值图与图 4(c) 的相位质量图, 可见采用式(4)的映射关系进行处理, 可以使在相位质量好的区域  $J$  取值较小, 以保持较高的相位分辨率, 而使在相位质量差的区域  $J$  取值较大, 以有效减少残差点数目。作为对比, 图 8 给出了分别采用模数滤波和圆周中值滤波的处理结果, 而表 2 则给出了经各种滤波方法处理后所得的干涉相位图在残差点数、相位标准偏差方面的比较结果。

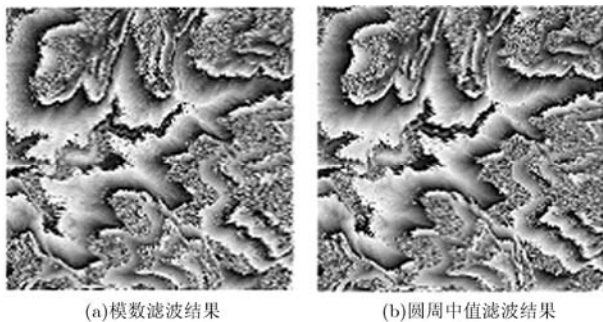


图 8 其他方法的相位滤波结果

表 2 不同滤波方法处理结果比较

方法	残差点数	相位标准偏差(PSD)
未滤波	536509	1.5408
模数滤波	57834	0.7096
圆周中值滤波	27155	0.5061
本文算法	26988	0.4236

对上述实验结果进行比较和分析, 在相位残差点抑制方面, 采用本文提出的自适应滤波方法可以使相位残差点数目有效减少, 特别是与模数滤波结果相比改善明显, 这极大降低了后续相位解缠的难度; 在相位噪声抑制方面, 本文提出的滤波方法可以使相位标准偏差(PSD)进一步减小, 这意味着干涉相位连续性和相位边缘特性的进一步改善, 图 9 为对不同方法获得的滤波结果, 取第 1620 列部分像素(该区域相位波动较大, 比较有代表性)所做的相位剖面图比较, 可见本文提出的滤波算法在滤除相位噪声方面取得了更好的效果, 相位异常波动更少, 这表明相位边缘特性得到了更好的保持。

## 5 结束语

本文提出了一种基于模数的干涉相位自适应中值滤波方法, 该方法根据干涉相位的随机分布特性, 构造了一个随干涉相位质量自适应变化的模数估计算子求模数, 并将其作为局部相位中心进行中值滤波, 从而改善对干涉相位噪声的抑制效果。通过对仿真和实测数据的处理表明: 该方法不仅可以克服

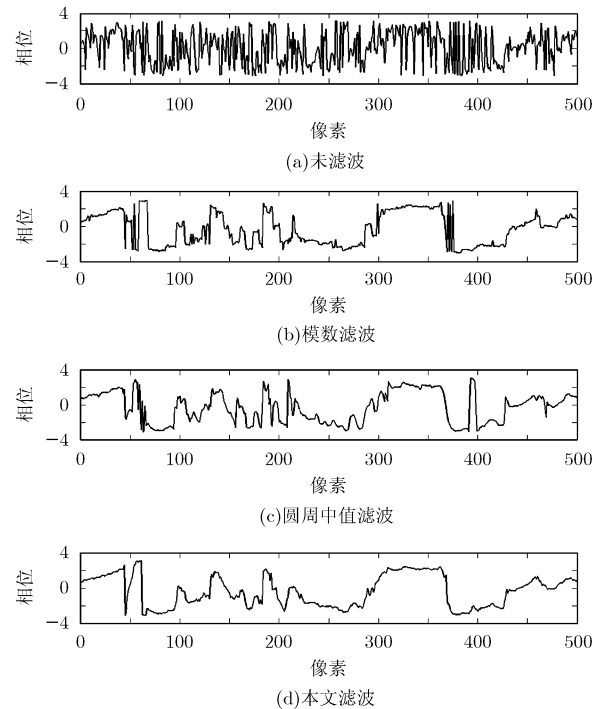


图 9 TerraSAR-X 实测数据的滤波相位剖面图对比

模数滤波引起的条纹边缘模糊问题, 而且具有良好的自适应特性, 可以避免对相干性较高区域的过滤波和对相干性较差区域的欠滤波问题。此外, 该滤波算法结构简单, 运算效率高, 是一种较为理想的干涉相位滤波方法。

## 参考文献

- [1] Zebker H A, Hensley S, Shanker P, *et al.* Geodetically accurate InSAR data processor[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(12): 4309-4321.
- [2] 耿辉, 谢亚楠, 王波, 等. InSAR 测高原理及精度分析[J]. *电子测量技术*, 2011, 34(2): 39-41.  
Geng Hui, Xie Ya-nan, Wang Bo, *et al.* Elevation measurement of InSAR and accuracy analysis[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2011, 34(2): 39-41.
- [3] Ferraluolo G, Meglio F, Pascasio V, *et al.* DEM reconstruction accuracy in multichannel SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2009, 47(1): 191-201.
- [4] Parizzi A and Bric R. Adaptive InSAR stack multilooking exploiting amplitude statistics: a comparison between different techniques and practical results[J]. *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*, 2011, 8(3): 441-445.
- [5] Candeias A L B, Mura J C, Dutra L V, *et al.* Interferogram phase noise reduction using morphological and modified median filters[C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGRASS)*, Firenze, 1995: 166-168.
- [6] Goldstein R M and Werner C L. Radar interferogram filtering

- for geophysical applications[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(21): 4035-4038.
- [7] Lopez-Martinez C and Fabregas X. Modeling and reduction of SAR interferometric phase noise in the wavelet domain[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(12): 2553-2566.
- [8] Réjichi S, Chaabane F, Tupin F, *et al.* Morphological filtering of SAR interferometric images[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGRASS), Hawaii, 2010: 1581-1584.
- [9] Goel K and Adam N. High resolution differential interferometric stacking via adaptive spatial phase filtering [C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGRASS), Vancouver, 2011: 1341-1344.
- [10] Wang Q, Huang H, Yu A, *et al.* An efficient and adaptive approach for noise filtering of SAR interferometric phase images[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(6): 1140-1144.
- [11] 严卫东, 倪维平, 赵亦工, 等. 自适应的改进 Goldstein 干涉相位图滤波算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(2): 248-253.  
Yan Wei-dong, Ni Wei-ping, Zhao Yi-gong, *et al.* Auto-adaptive filtering of the InSAR interferometric phase based on the modification Goldstein algorithm[J]. *Journal of Xidian University*, 2010, 37(2): 248-253.
- [12] Yong B and Mercer B. Interferometric SAR phase filtering in the wavelet domain using simultaneous detection and estimation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(4): 1396-1416.
- [13] 李晨, 朱岱寅. 基于信噪比门限判断和小波变换的 SAR 干涉图滤波法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(2): 497-500.  
Li Chen and Zhu Dai-yin. A SAR interferogram noise reduction algorithm based on the SNR threshold and wavelet transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(2): 497-500.
- [14] Bickel D R. Robust and efficient estimation of the mode of continuous data: the mode as a viable measure of central tendency[J]. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 2003, 73(12): 899-912.
- [15] Bickel D R and Frühwirth R. On a fast, robust estimator of the mode: comparisons to other robust estimators with applications [J]. *Computational Statistics and Data Analysis*, 2006, 50(12): 3500-3530.
- 葛仕奇: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为干涉合成孔径雷达、航天遥感实时信号处理.
- 陈亮: 男, 1981年生, 讲师, 研究方向为航天遥感信息处理理论与系统设计.
- 龙腾: 男, 1968年生, 教授, 博士生导师, 从事目标探测与识别理论与技术、信息处理理论与技术等方面的研究.