

文章编号:1001-1595(2009)03-0210-06

一种基于条纹中心线的 InSAR 干涉图滤波方法

王耀南¹,彭曙蓉^{1,2},邓积微¹,李灿飞¹

1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410075

InSAR Interferogram Filtering Based on the Center Lines of the Interference-stripes

WANG Yaonan¹, PENG Shurong^{1,2}, Deng Jiwei¹, Li Canfei¹

1. College of Electrical and Information Engineering of Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Electrical and Information Engineering of Changsha University of Science and Technology, Changsha 410075, China

Abstract: Removing the noise of the interference-stripes images is one important step during the data processing of InSAR. Aimed at the anisotropic characteristic, a method for InSAR interferogram filtering method based on the center lines of the interference-stripes is proposed. Considering the difficulty to obtain the center lines of the stripes, the algorithm proposed in this paper extracts the center lines of interference-stripes quickly by using CNN (Cellular Neural Networks) algorithm for its parallel feature to process data. The experiment results with good visual feature, little residue and strong image edges and details holding ability show that this method is efficient, at the same time the cost of time spent for better effect is greatly decreased.

Key words: InSAR; cellular neural networks; interference-stripes center lines

摘 要:干涉条纹图噪声的滤除是 InSAR 数据处理的关键步骤之一。针对干涉条纹图各向异性特征,提出一种基于条纹中心线的 InSAR 干涉图滤波算法,考虑到干涉条纹中心线获取的复杂性,此算法采用神经网络快速提取干涉条纹图的条纹中心线。通过用真实的 InSAR 干涉图实验证明此方法具有很好的滤波效果,滤波结果视觉特征良好、残余点减少,保持了图像的边缘和细节特征,而且降低了为滤波效果所付出的时间代价。

关键词:InSAR;神经网络;干涉条纹中心线

中图分类号:P237 文献标识码:A

基金项目:国家自然科学基金(60874096,60872130);教育部高校科技创新重大项目培育基金(706043);湖南省教育厅科研项目(07C073,07B042)

1 引 言

合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术是目前最具潜力快速获取高精度数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)和检测地表形变的一种技术。它具有全天时、全天候的特点。但是,影响其实际应用的因素还有很多,尤其是干涉图中大量噪声的存在,直接影响到后面相位的展开。因此,在对干涉相位图进行解缠运算之前对其高强度斑点噪声进行滤波处理,以降低噪声对 2 维相位解缠算法效率、可靠性和精度的影响,是关键的处理步骤之一。

InSAR 干涉相位图的噪声主要包括^[1]:

1. 干涉 SAR 系统的空间去相关、时间去相关等因素引发的噪声。这是干涉系统的特有噪声。这部分噪声主要依赖干涉的基线长度和下视

角、雷达的系统带宽、地形的变化等;

2. SAR 图像的相干斑噪声。由于 SAR 系统的分辨率是有限的,目标表面相对于系统波长比较粗糙,图像中的每一分辨单元都是由许多散射点合成,雷达记录的信号是不同散射中心回波矢量的叠加。由于散射中心的回波相位是随机变化的,这种随机变化就造成了相干斑噪声。同样由于干涉图像由两幅 SAR 图像合成,因此相干斑噪声在干涉 SAR 图像中表现得更为明显,即便强反射区域也将受到相干斑噪声的影响;

3. 由雷达系统本身引起的热噪声,属于附加噪声,可以通过提高雷达系统本身的信噪比以满足图像质量的需求。由于干涉 SAR 是利用两幅 SAR 图像合成的,所以尽管通常情况下雷达接收机的信噪比能够满足一般 SAR 成像的要求,但在信号强度稍弱的区域,干涉 SAR 图像的信噪比却会非常低。

InSAR 数据记录了包含幅值和相位的复数据。该复数据本身也包含大量原始的随机斑点噪声,但是在共轭相乘干涉条纹的过程中,相关的斑点噪声已经被相互抵消减掉了,剩下的只是各种去相关因素引起的斑点噪声。Lee 证明了 InSAR 条纹图噪声为加性噪声^[2],如式(1)所示

$$\phi = \phi + n \tag{1}$$

其中, ϕ 为所测得的相位, ϕ 为相位真值, n 为噪声。噪声的均值为零,标准差是视数和相干系数的函数。

现有的 InSAR 干涉图滤波方法主要有:在复数域对其进行均值或中值滤波^[3]、基于多视处理的滤波^[4]、基于局部坡度的自适应滤波及其改进方法^[5-7]、基于小波变换的滤波^[8],等值线窗口滤波等^[9]。其中基于局部坡度和等值线窗口的方法考虑到了条纹图的各向异向特征,滤波效果相对来说好一些,但等值线窗口的获取是一个复杂的过程。本文提出一种基于干涉条纹中心线的 InSAR 干涉图滤波算法,利用细胞神经网络(CNN)的异步并行处理方式快速提取条纹的中心线,从而获取沿条纹中心线的滤波窗口代替传统算法的矩形滤波窗口。实验证明该算法效果很好。

2 基于干涉条纹中心线的 InSAR 干涉图滤波算法

2.1 算法步骤

基于干涉条纹中心线的滤波算法是针对 InSAR 干涉条纹图的各向异性特征提出的,因为常用的矩形滤波窗口会引起较大的误差。该算法的具体操作步骤如下:

1. 条纹中心线的获取是一个耗时复杂的过程,利用细胞神经网络(CNN)的并行处理特性快速获取干涉条纹图的条纹中心线;

2. 根据条纹中心线求取滤波窗口;

3. 利用步骤 2 中所获取的滤波窗口对干涉条纹图进行滤波,考虑到 InSAR 干涉相位条纹图有 2 跳变线,采用正余弦滤波法实现 InSAR 干涉图的滤波。

2.2 用细胞神经网络(CNN)提取条纹中心

细胞神经网络(CNN)是一个实时处理信号的大规模非线性模拟电路,采用的是异步并行处理方式。它的基本功能是将输入图像映射成相应的输出图像,同时输出图像是以 -1 和 1 作为其像元值的二值图像,通过对 CNN 模板进行设置,

可以实现对条纹中心线的提取^[10]。设待处理图像有 $M \times N$ 个像素,则 CNN 包含 $M \times N$ 个细胞,像素与细胞一一对应。第 i 行第 j 列的细胞称为 $c(i, j)$,它的半径为 r 的近邻细胞 $N_r(i, j)$ 定义如式(2)所示:

$$N_r(i, j) = \{c(k, l) | \max[|k - i|, |l - j|] \leq r, 1 \leq k \leq M; 1 \leq l \leq N\} \tag{2}$$

式中, r 是一个正整数。

每一个细胞的动态过程可用式(3)描述:

$$C \frac{\partial x_{ij}(t)}{\partial t} = -\frac{1}{R_x} x_{ij}(t) + \sum_{c(k,l) \in N_r(i,j)} A(i, j; k, l) y_{kl}(t) + \sum_{c(k,l) \in N_r(i,j)} B(i, j; k, l) u_{kl}(t) + I \tag{3}$$

$$y_{ij} = f(x_{ij}) = \frac{1}{2} [|x_{ij} + 1| - |x_{ij} - 1|] = \begin{cases} 1 & x_{ij} = 1 \\ x_{ij} & |x_{ij}| < 1 \\ -1 & x_{ij} = -1 \end{cases} \tag{4}$$

其中, $1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$ 。 C, R_x, I 分别为细胞等效电路中的线性电容、线性电阻及独立电流源, x_{ij} 表示每个细胞的状态变量, u_{kl} 表示邻域细胞 $c(k, l)$ 的输入, y_{kl} 表示邻域细胞的输出, $A(i, j; k, l)$ 表示 $A(i, j; k, l)$ 的输出 y_{kl} 与 $c(i, j)$ 之间的联接权, $B(i, j; k, l)$ 表示 $c(i, j)$ 的输入 u_{kl} 与 $c(i, j)$ 的联接权。由元素 $A(i, j; k, l)$ 组成的反馈模板 A 和由元素 $B(i, j; k, l)$ 组成的控制模板 B 分别由 $(2r + 1)^2$ 个元素组成,而每个细胞与近邻细胞之间的联接权都是由 A 和 B 中的元素所决定的。式(4)表示输出与状态之间的关系,是一个分段线性函数。CNN 系统是稳定的,且如果电路参数满足约束条件 $A(i, j; k, l) > 1/R_x$,则 CNN 在经历一个暂态过程后总是收敛到如式(5)所示的恒定的稳态值^[11]。

$$\left. \begin{aligned} \lim_t |x_{ij}(t)| > 1, & \quad 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N \\ \lim_t |y_{ij}(t)| = \pm 1, & \quad 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

本文采用基于 CNN 的方法获取干涉图的条纹中心线。在 CNN 处理中取邻域半径 $r = 1$,则邻域范围为 3×3 ;取时间常数 $\tau = R_x C$,它反映了网络动态过程的快慢,实际仿真电路参数选择为 $C = 1, R_x = 1(\tau = 1), I = 0$;把图像的初始灰度值作为 CNN 细胞的初始状态值,初始输出值等于初始状态值;经过多组参数学习实验,反馈模板 A

和控制模板 B 的选择如图 1 所示,则每个细胞的状态方程(式(3))可改写为式(6),式中右边第二项表示邻域中的每个细胞的输出值分别与模板 A 中对应的元素 y_{kl} 相乘后求和。细胞的状态变量由细胞的初始状态值、邻域细胞的输出、A 模板算子及网络参数决定。当 t 时,由于 CNN 的性质,状态变量 x_{ij} 趋于 1 或 -1。干涉条纹图像经 CNN 滤波处理后,已经变成具有一定宽度的二值条纹。接下来利用 CNN 的非线性动态收敛特性,使二值图像经过该网络后,迅速收敛到一个细化图像从而得到干涉图的条纹中心线。

$$\frac{\partial x_{ij}(t)}{\partial t} = -x_{ij}(t) + \sum_{c(k,l) \in Nr(i,j)} A(i,j;k,l) y_{kl}(t) \quad (6)$$

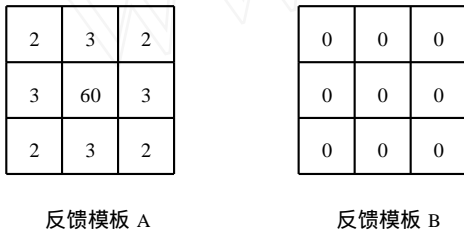


图 1 反馈模板 A 与控制模板 B 的设置

Fig. 1 Values of feedback template A and control template B

2.2 基于条纹中心线的等相位线滤波窗口

2.2.1 求取条纹方向

采用平面拟合法获取干涉图的条纹方向信息:先对条纹图像当前点进行局部最小二乘平面拟合,再确定拟合平面的方向导数为零的方向,以此方向为条纹方向^[12]。设条纹图像上某一点及其邻域的灰度为 f_{xy} ,对其进行拟合的平面方程为

$$g(x, y) = a + bx + cy \quad (7)$$

用最小二乘法在此邻域上进行平面拟合,得

$$\left. \begin{aligned} a + b x_{x,y} + c y_{x,y} &= f_{x,y} \\ a + b x_{x,y}^2 + c x_{x,y} y_{x,y} &= f_{x,y} x_{x,y} \\ a + b y_{x,y} + c x_{x,y} y_{x,y} &= f_{x,y} y_{x,y} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将坐标原点建于当前点,取邻域为对称区域,则式(8)中包含 $x_{x,y}, y_{x,y}, x_{x,y} y_{x,y}$ 的项都为零;取 x, y 为同样的范围,则 $x_{x,y}^2 = y_{x,y}^2$ 。于是可以得到 $x_{x,y}^2 = y_{x,y}^2, x_{x,y}^2 = y_{x,y}^2, x_{x,y}^2 = y_{x,y}^2$

y^2 。取拟合平面方向导数为零的方向为条纹方向,该条纹方向即条纹的切线方向:

$$= \arctan \left[\frac{\partial g(x, y)}{\partial y} / \frac{\partial g(x, y)}{\partial x} \right]_{x=y=0} = \arctan \frac{c}{b} = \arctan \frac{f_{xy} y}{f_{xy} x} \quad (9)$$

鉴于 InSAR 干涉条纹图相位分布有明显的 2 跳变,不能直接对其使用平面拟合法求取条纹方向,而其正弦变换及余弦变换是连续的,所以要先将其作正弦变换或余弦变换,再利用式(9)求得正弦图或余弦图的条纹方向,由式(10)可知,此方向与干涉相位图的方向是一致的。有了条纹切线方向,条纹法线方向也不难得到。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\sin \phi)}{\partial y} &= \cos \phi \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial \phi}{\partial y} \\ \frac{\partial(\sin \phi)}{\partial x} &= \cos \phi \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ \frac{\partial(\cos \phi)}{\partial y} &= -\sin \phi \frac{\partial \phi}{\partial y} = -\frac{\partial \phi}{\partial y} \\ \frac{\partial(\cos \phi)}{\partial x} &= -\sin \phi \frac{\partial \phi}{\partial x} = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

2.2.2 获取等相位线滤波窗口

条纹中心线对应于干涉条纹的波峰或者波谷位置,是相位为 k 的等相位线。所以根据条纹中心线直接确定的滤波窗口,考虑到了干涉条纹图的各向异性特征,滤波结果将更加精确。根据条纹中心线获取滤波窗口的方法如下:

1. 如果当前点位于中心线上,该点的等相位线滤波窗口可以直接跟踪条纹中心线得到,如图 2(a)所示。
2. 如果当前点位于两条中心线之间,如图 2(b)所示,则滤波窗口由到两相邻中心线距离之比为一定值的点组成,这个设定的距离比就是当前点所对应的距离比:

$$a/b = c/d \quad (10)$$

其中, a 和 b 为当前点到两相邻中心线的距离, c 和 d 为下一点到两边中心线的距离。距离的求取可以沿着条纹的法向方向跟踪得到(法线方向可从 2.2.1 获取的条纹方向图得到)。

3. 如果当前点位于一条中心线的一边,而另一边没有中心线(如图像边缘位置),如图 2(c)所示,此时就以与该中心线等距的曲线近似作为滤波窗口。

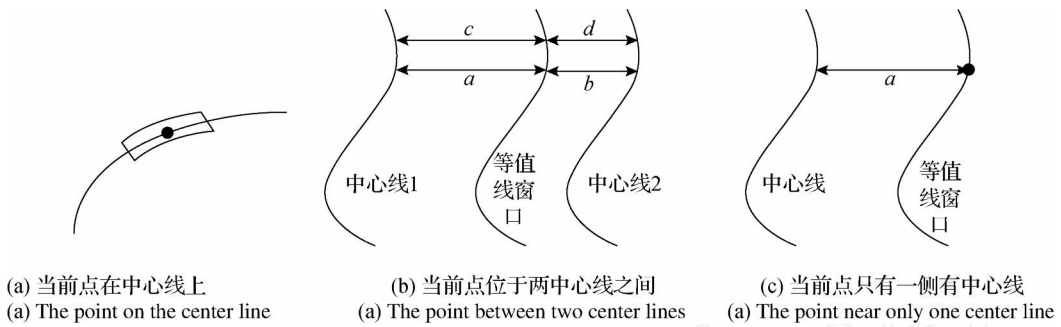


图 2 等相位线滤波窗口的获取

Fig. 2 Obtain the contoured filtering windows

2.3 基于条纹中心线的 InSAR 干涉图滤波

InSAR 干涉相位条纹图有 2 跳变线,不能直接对这种带跳变线的图像做低通滤波,因为低通滤波会严重损坏跳变线。采用正余弦变换与条纹等相位线滤波窗口结合能够完全消除 InSAR 相位图上的散斑噪声^[13],而且在理论上丝毫不损伤相位的分布。式(1)给出了 InSAR 干涉相位图中的相位及噪声的模型,对相位图滤波时,设 ϕ 为对 ϕ 滤波后的结果相位。若采用上文所获取的条纹等相位线窗口对 ϕ 的正余弦变换图分别均值滤波,则有

$$\phi = \arctan \frac{\sin(\phi + n)}{\cos(\phi + n)} = \arctan \frac{\sin \phi \cos n + \cos \phi \sin n}{\cos \phi \cos n - \sin \phi \sin n} \quad (11)$$

因为滤波只在条纹等相位线窗口内进行,相位 ϕ 保持不变,即

$$\left. \begin{aligned} \sin \phi &= const \\ \cos \phi &= const \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

此时式(11)可以表示为

$$\phi = \arctan \frac{\sin \phi \cos n + \cos \phi \sin n}{\cos \phi \cos n - \sin \phi \sin n} \quad (13)$$

n 为零均值对称分布斑点噪声,根据随机散斑统计特性,如果假定窗口尺寸足够大,则存在下面的关系

$$\sin n = 0 \quad \cos n = 0 \quad (14)$$

于是可以从式(9)得到

$$\phi = \arctan \frac{\sin \phi \cos n}{\cos \phi \cos n} = \arctan \frac{\sin \phi}{\cos \phi} = \phi \quad (15)$$

式(15)说明在条纹等相位线窗口内,InSAR 干涉相位图中的去相关噪声能够在不使相位图模糊畸变的条件下被全部滤除。如果将相位条纹图变换到相应的连续正弦图和余弦图,再将滤波后的正余弦图用反正切运算变换为相位图,就完成了对 InSAR 相位图的条纹中心线窗口滤波。

3 实验结果

基于篇幅,仅将本文方法与经典的矩形窗口中值滤波算法进行比较。取两幅大小为 1 024(方位向) \times 1 024(距离向)像元的 InSAR 干涉图为实验对象,图像分别取自新疆喀什地区和三峡地区,对这 2 幅图分别进行基于矩形窗口的中值滤波和本文所提出的方法滤波,采用 MATLAB 软件仿真。实验结果如图 3 和图 4 所示。两图中,(a)为原始相位图像,图中最暗点的值为 - ,最亮点的值为 。从图中可以看出,暗条纹和亮条纹之间的边界不清晰。(b)为用矩形滤波窗口对(a)作中值滤波后的结果。(c)为采用本文算法滤波后的结果。从视觉特征上看,本文所采用的基于干涉条纹中心线的滤波方法效果比较好,在相位突变处的平滑相对要小,暗条纹和亮条纹之间的边界更清晰。

干涉图滤波的直接目的是相位解缠,干涉图中残余点的存在严重影响相位解缠的顺利进行,因而在干涉 SAR 处理中一般用残余点数目作为评估相位图噪声抑制的性能指标,残余点越多则说明相位图受噪声污染越严重,即干涉图像的信噪比越低。实验处理后的干涉图中残余点数列于表 1 中。从表 1 可知,2 种滤波算法都明显减少了干涉图中残余点数,而本文提出的算法得到的干涉图中残余点数更少。这主要是因为矩形滤波窗口没有考虑干涉条纹图的各向异向特征。但是

由于基于条纹中心线的滤波窗口较之矩形滤波窗口不易获取,滤波时间大大增加了。对于 $1\ 024 \times 1\ 024$ 大小的干涉图,基于矩形滤波窗口的中值滤波法需要的时间为大约 18 s;对于条纹中心线滤

波方法,若采用传统方法获取条纹中心线,需 40 s 左右的时间,如果采用本文的 CNN 方法获取条纹中心线,则可将滤波时间降到 28 s 左右。

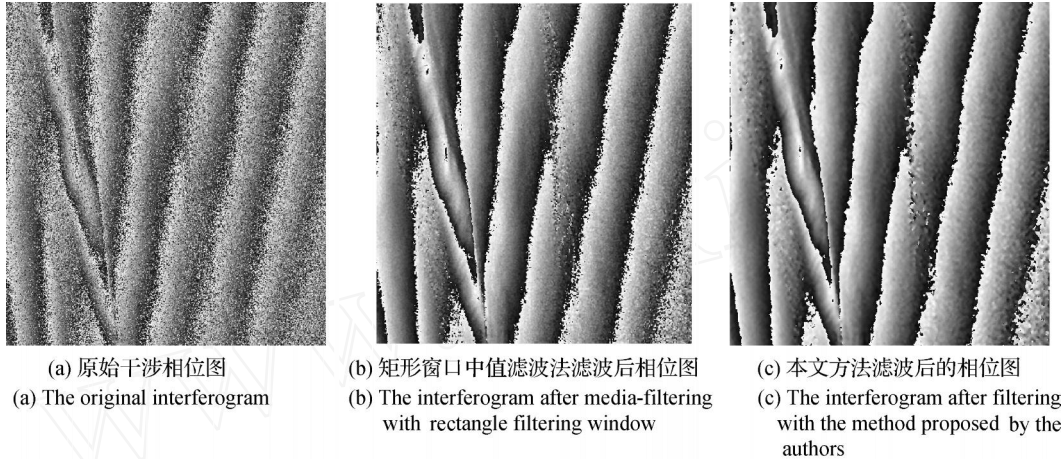


图 3 新疆喀什地区 InSAR 干涉图滤波结果比较

Fig. 3 The results of KASHI area interferogram filtered

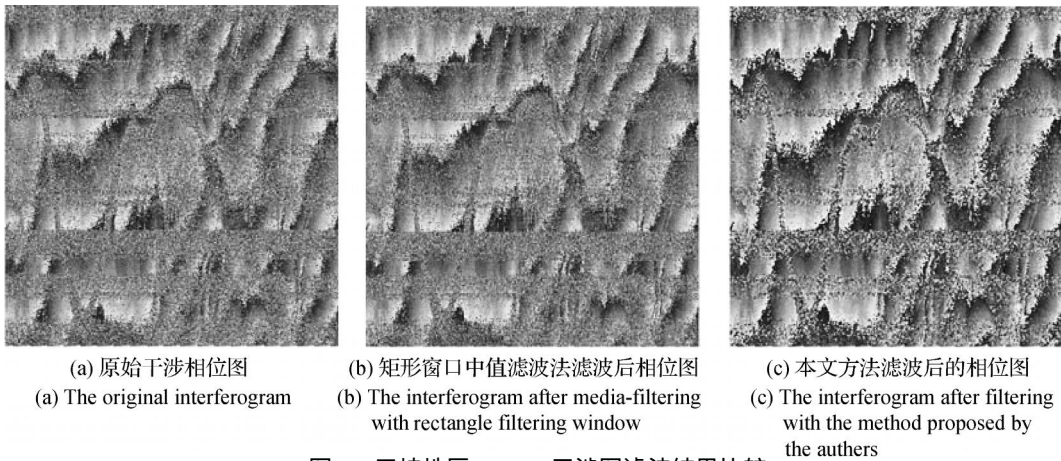


图 4 三峡地区 InSAR 干涉图滤波结果比较

Fig. 4 The results of SANXIA area interferogram filtered

表 1 各种情况下相位残余点数列表

Tab.1 Comparison of the number of interferogram's residues

成像地区	原始图像残余点数	矩形窗口中值滤波法残余点数	干涉条纹中心线滤波方法残余点数
喀什地区	147 795	2 954	598
三峡地区	158 649	86 058	12 736

4 结 论

本文在对 InSAR 干涉图用 CNN 快速求取干涉条纹中心线的基础上获取条纹等相位线窗口,

通过用条纹等相位线窗口对干涉图作正余弦滤波。实验证明,该算法滤波结果视觉特征良好、残余点大大减少,很好地保持了图像的边缘特征和细节特征,是一种有效的 InSAR 干涉图噪声抑制方法。而本文采用细胞神经网络方法来获取条纹中心线,又在一定程度上弥补了为获取更高精度的滤波效果所付出的时间代价。因此本文所提出的基于条纹中心线的 InSAR 干涉图滤波算法具有一定的实用价值。

参考文献:

[1] ZEB KER H A, VILLASENOR J. Decorrelation in Inference

- metric Radar Echoes[J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(5): 950-959.
- [2] LEE J S, AINSWORTH T L, GRUNES M R, GOLDSTEIN R M. Noise Filtering Interferometric SAR Images [C]// Proc SPIE European Symp Rome. Rome:[s. n.], 1994:735-742.
- [3] LIAO Mingsheng, LIN Hui. Radar Interferometry Measure—Principle and Signal Processing Foundation[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2003. (廖明生,林琨. 雷达干涉测量——原理与信号处理基础[M]. 北京:测绘出版社,2003.)
- [4] RODRIGUEZ E, MARTIN J M. Theory and Design of Interferometric Synthetic Aperture Radars[J]. IEE Proceedings-F, 1992, 139(2): 147-159.
- [5] LEE J S, PAPANASSIOU K P, AINSWORTH T L, et al. A New Technique for Noise Filtering of SAR Interferometric Phase Images[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1998, 36(5): 1456-1465.
- [6] TROUVE E, NICOLAS J, MAITER H. Improving Phase Unwrapping Techniques by the Use of Local Frequency Estimates[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1998, 36(6): 1963-1972.
- [7] WU N, FENG D Z, LI J X. A Locally Adaptive Filter of Interferometric Phase Images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(1): 73-77.
- [8] HE R Y, WANG Y N. InSAR Interferogram Filtering Based on Wavelet Transform[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica. 2006, 35(2): 128-132. (何儒云,王耀南. 一种基于小波变换的 InSAR 干涉图滤波方法[J]. 测绘学报,2006,35(2):128-132.)
- [9] YU Q, YANG X, FU S, et al. An Adaptive Contoured Window Filter for Interferometric Synthetic Aperture Radar [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2007, 4(1): 23-26.
- [10] WANG Huaiying, YU Shenglin, FENG Qiang. CNN for Extracting the Center of Interference Stripes [J]. Acta Metrologica Sinica. 2006, 27(2): 117-120. (王怀颖,于盛林,冯强. 一种用神经网络提取干涉条纹中心的新方法[J]. 计量学报,2006:27(2):117-120.)
- [11] CHUA L O, YANG L. Cellular Neural Networks: Applications[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1988, 35: 1273-1290.
- [12] YU Q F, SUN X Y. Removing Speckle Noise and Extracting the Skeletons from a Single Speckle Fringe Pattern by Spin Filtering with Curved-surface Window [J]. Optical Engineering, 2003, 41(1): 68-74.
- [13] AEBISCHER H A, WALDNER S. A Simple and Effective Method for Filtering Speckle Interferometric Phase Fringe Patterns[J]. Optics Communications, 1999, 162: 205-210.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期:2008-04-28

修回日期:2008-11-19

第一作者简介:王耀南(1957-)男,教授,博士生导师,主要从事图像处理识别理论及其应用、智能控制研究。

E-mail: peng_sr @126. com

First author: WANG Yaonan (1957-), male, professor, PhD supervisor. Majors in intelligent control theory and application, intelligent information processing and fusion. E-mail: peng_sr @126. com

(上接第201页)

- 喀拉地块龙日坝断裂带的发现及其大地构造意义 [J]. 中国科学:D 辑, 2008, 38(7): 785-796.)
- [17] ZHAO Zhu, FAN Jun, ZHENG Sihua, et al. The Crustal Velocity Structure of Longmenshan Fault Belt and the Fine Revised of Hypocentral Location [J]. Acta Seismologica Sinica, 1997, 19(6): 615-622. (赵珠,范军,郑斯华,等. 龙门山断裂带地壳速度结构和震源位置的精确修订[J]. 地震学报, 1997, 19(6): 615-622.)
- [18] WANG Chunyong, MOONEY W D, WANG Xili, et al. Study on 3-D Velocity Structure of Crust and Upper Mantle in Sichuan-Yunnan Region, China [J]. Acta Seismologica Sinica, 2002, 24(1): 1-16. (王椿镛, Mooney W D, 王溪莉,等. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究 [J]. 地震学报, 2002, 24(1): 1-16.)
- [19] WANG Y. Heart Flow Pattern and Lateral Variations of Lithosphere Strength in China Mainland: Constraints on Active Deformation [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2001, 126: 121-146.
- [20] ZHANG Chaojun, CAO Jianling, SHI Yaolin. The Viscosity Research of Lower Crust of the Qinghai-Tibet Plateau from Postseismic Deformation [J]. Science in China: D, 2008, 38(10): 1250-1257. (张晁军,曹建玲,石耀霖. 从震后形变探讨青藏高原下地壳黏滞系数[J]. 中国科学:D 辑, 2008, 38(10): 1250-1257.)

(责任编辑:张燕燕)

收稿日期:2009-02-11

修回日期:2009-04-07

第一作者简介:许才军(1964-),男,长江学者特聘教授,研究方向为大地测量学。

First author: XU Caijun (1964-), male, the Yangtse River scholar distinguished professor, majors in geodesy.