

文章编号: 1007-4619 (2003) 02-0098-08

INSAR 干涉条纹图的复数空间自适应滤波

廖明生^{1,2}, 林 琨¹, 张祖勋², 杨 文², 张 力²

(1 香港中文大学 地球信息科学联合实验室, 香港; 2 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

摘 要: 干涉雷达成像之 SLC 影像是未经任何预处理的, 斑点噪声将影响到强度和相位两个方面。但是, 通常的滤波方法主要针对幅度影像。照搬这些方法很可能会影响到实际的相位值。合理的滤波方法对于后续的数据处理是非常重要的。该文从干涉成像机理出发提出了一个中值-自适应平滑滤波的解决方案, 避免了估计局部地形的复杂计算, 又可获得满意的去噪效果。

关键词: 合成孔径雷达; 干涉雷达; 滤波; 自适应算法; 斑点噪声

中图分类号: TP722.6/TP751.1 **文献标识码:** A

1 引 言

通常合成孔径雷达(SAR)成像处理所得的图像是反映了每一个像素与目标后向散射(backscatter)系数 σ 的对应关系,但是,雷达是时间测距的传感器,接收到的信号实际上还包含了相位信息。因此,可以用复数形式来表示其幅度和相位。

干涉雷达技术(Interferometric SAR, INSAR)充分利用雷达回波信号所携带的相位信息来得到地表的三维地形信息。其原理是通过两副天线同时观测(单轨道双天线模式),或两次平行的观测(单天线重复轨道模式),获得同一区域的重复观测数据,即单视复数(Single-look Complex, SLC)影像对;由于两副天线和观测目标之间的几何关系,同一目标对应的两个回波信号之间产生了相位差,由此得到的相位差影像通常称为干涉图(interferogram),再结合观测平台的轨道参数和传感器参数等可以获得高精度、高分辨率的地面高程信息。利用差分干涉技术可以精密测定诸如地表沉降等微小形变。从近几年来公开发表的文献来看,INSAR的研究领域非常活跃^[1]。

从初始的SLC影像对来提取地面高程信息,包含有许多环节。其中,噪声在干涉数据的处理过程中也是很难避免的。SLC影像是未经任何预处理的,斑点噪声(speckle)和其他来源的噪声将影响到

幅度和相位两个方面。通常的滤波方法主要针对幅度影像,这个方面已有大量的文献论述^[2-4]。但是,对于INSAR中所生成的干涉图,照搬这些方法会影响到实际的相位值。合理的滤波方法对于后续的数据处理工作乃至最终生成的DEM的质量是非常重要的。本文从INSAR的成像机理出发,提出一个中值-自适应平滑滤波的解决方案,既可以避免复杂的计算,又可以获得满意的去噪效果。

2 在复数域对干涉图进行去噪处理的原理

由INSAR的基本原理可知,求得真实的相位差后,才能计算出高程值。为了讨论方便,将干涉成像的公式列出:

$$\begin{aligned} u_{\text{int}} &= u_1 u_2^* \\ &= |u_1| |u_2| e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \\ &= |u_{\text{int}}| e^{j\varphi'} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\varphi' = \text{mod}(\varphi, 2\pi) = \arctan \left[\frac{\text{Im}(u_{\text{int}})}{\text{Re}(u_{\text{int}})} \right] \quad (2)$$

这里, $u_1, u_2, |u_1|, |u_2|, \varphi_1, \varphi_2$ 分别是复数像对的复影像和对应的幅度和相位。 $|u_{\text{int}}|$ 和 φ' 分别是干涉影像的幅度和相位。

如(1)和(2)式所示,干涉图中得到的相位 φ' 实际上只是主值,其取值范围在 $(-\pi, +\pi)$ 之间,要

收稿日期: 2001-03-16; 修订日期: 2001-12-10

基金项目: 香港研究基金(RGC)(CUHK 4434/98E)和测绘科技发展基金(99008)资助。

作者简介: 廖明生(1962—),男,原武汉测绘科技大学摄影测量与遥感专业博士学位,香港中文大学博士后研究员,现为武汉大学教授,博士生导师,从事遥感影像信息处理和应用等方面的研究,近几年来已发表论文50余篇。

得到真实的干涉相位 φ 必须在这个值的基础上加上或减去 2π 的整数倍, 这样的过程称为相位解缠 (phase unwrapping)。如果没有噪声和其它干扰的理想情况下, 提取相位的偏导数, 通过一个简单的积分运算就可以反演出真实的相位差。但是, 如果有噪声存在, 就可能造成相位数据的不连续性和不一致性, 这样可能使得在上述积分过程中产生局部误差, 导致积分结果的不相容 (沿不同路径的积分结果不一致), 局部误差会在解缠过程中传播, 这一现象称为残余 (residue)。残余问题在相位解缠中普遍存在, 对相位解缠的效率、精度有很大的影响。在形成干涉图后, 一个重要的工作就是要尽量滤除噪声、提高信噪比, 减少残余出现的频度, 以提高解缠的精度和效率^{5,9}。

相位解缠是针对干涉条纹图进行的, 它实际上就是干涉复影像 u_{im} 的相位部分 φ' , 未经解缠之前其取值范围是 $(-\pi, +\pi)$, 对相位分量进行滤波处理要特别小心。这里的滤波目的, 不仅在于提高信噪比, 改善干涉图的视觉效果, 而且要在保持好相位 φ' 分布规律基础上, 来消除噪声影响。例如, 设有两个干涉相位值 $\pi/4$ 和 $7\pi/4$, 分别解缠后的均值是 π 。但是, 如果在解缠之前进行平滑处理的话, 其平均值解缠后的均值是 0, 而不是 π 。

从信号处理的原理来看, 干涉成像后的复影像 u_{im} 被认为是待处理的信号, 复数可以表示成幅度和相位。因此, 干涉相位只是干涉复影像 u_{im} 的一个分量, 或者说是在其中的一个属性。对干涉条纹图的滤波处理应该在提取相位值 φ' 之前的复数信号域中进行 (以下简称复数域), 而不是直接处理相位值。

例如, 欲用平滑方法来进行滤波处理, 不能够按下面的式子

$$\varphi'_{m,n} = \frac{\sum \varphi'_{i,j}}{MN} \quad (3)$$

来处理, 这里 MN 为平滑窗口的大小 $M \times N$ 。而是应该按 (4) 式进行

$$\varphi'_{m,n} = \arctg \left(\frac{\sum \sin \varphi'_{i,j}}{\sum \cos \varphi'_{i,j}} \right) \quad (4)$$

这里, 请注意在 (4) 中, 实际计算是分别在实部和虚部进行的, 它们的值域为 $(-\infty, +\infty)$, 也就不存在类似于相位运算中取主值的问题了⁶。

文献[6]也从保持干涉图中条纹边缘的角度进行了探讨, 指出直接处理条纹图 (即相位值) 也是不可取的。干涉条纹图的边缘被平滑之后, 不可能很好地

保持陡峭的形状, 这样会影响到相位解缠的结果。

综上所述, INSAR 数据中噪声和信号的分布有其本身的规律, 简单的平滑处理并不能达到理想的效果, 有些针对光学干涉条纹图的滤波方法^[7,8], 同样也不能在这里直接应用。

3 干涉图的自适应滤波方法

3.1 干涉图滤波的策略

Jong-Sen Lee 提出了一种基于局部坡度 (Local Slope) 的自适应滤波方法^[9], 其基本思路是:

(1) 在局部窗口进行相位解缠估计局部的坡度值, 坡度值大的地方, 条纹密集, 取较小的滤波窗口; 坡度值小的地方, 条纹稀疏, 则取较大的平滑窗口。

(2) 在条纹边缘处, 采用非矩形窗口, 沿边缘方向进行滤波。

(3) 实施滤波可以在解缠后的相位图上进行或者在复数信号上进行。

Thouvenot 等以类似的思想结合局部坡度的估算来解决去除噪声, 并同时相位解缠^[10]。

以上算法有两个方面的问题导致实际操作变得十分复杂。一是求坡度需要进行相位解缠, 其本身是很耗时的, 并且受到噪声的影响; 二是要检测条纹边缘的位置和判断边缘的方向后确定滤波窗口的形状。

目前, 欧洲空间局和 JPL 等发布的处理软件中仍然是采用简单的平滑处理 (即多视处理), 在复数影像上进行滤波。这种方法虽然简单快捷, 但是处理效果对于实际的 INSAR 数据并不很理想。如图 1 所示, (a) 是取自 SIR-C 之 L 波段的干涉条纹之局部, (b) 是其剖面图, 在本文 4.1 将对该实验数据作详细说明; (c) 和 (e) 分别是在复数影像上进行了简单的平滑处理和中值滤波的结果; (d)、(f) 分别是 (c)、(e) 对应的剖面图; (a)、(c)、(e) 上的黑色竖线标示了切取剖面图的位置。图 2 则是对应的实部和虚部的剖面图。在图 1 和图 2 中, 滤波前后的效果比较显示, 简单的平滑处理和中值滤波效果均有限。

针对上述问题, 本文应用基于干涉图信号梯度的自适应平滑算法, 去除干涉条纹图的噪声。其优点是: 图像按梯度信息进行自适应平滑, 不会使边缘模糊; 同时, 算法结构简单, 一般进行 3—5 次迭代即可达到很好的滤波效果。

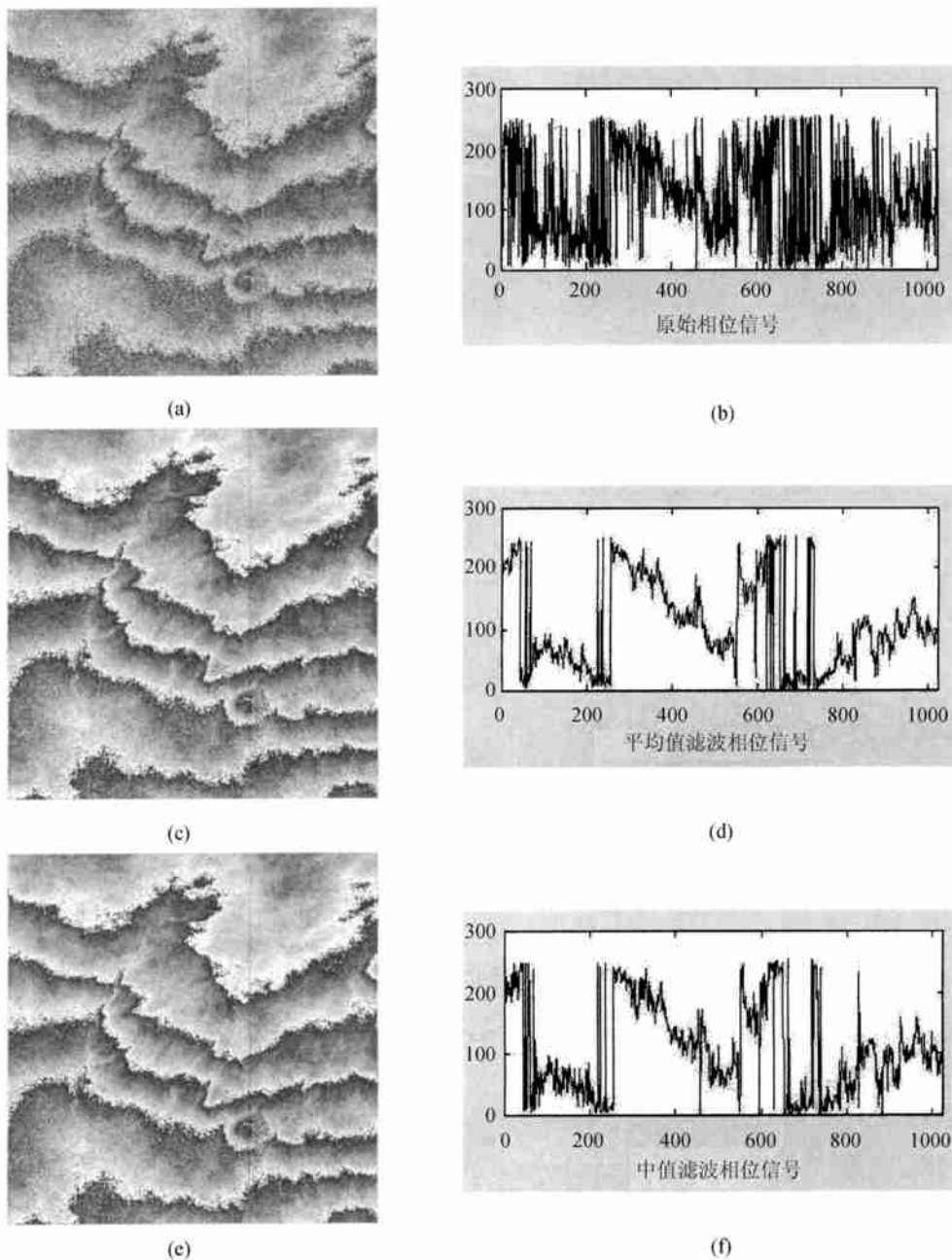


图 1 SIR-C 干涉条纹简单平滑处理的结果

Fig. 1 Results from filtering the fringe with simply averaging

3.2 自适应平滑滤波原理

不失一般性,以一维信号为例, $s(x)$ 为干涉图的实部或虚部。 $w(x)$ 是滤波窗口函数。一般的等权值小窗口平滑滤波器,可以表示为^[11] :

$$s^{(t+1)}(x) = \frac{1}{s_0} \sum_{i=-1}^{+1} s^{(t)}(x+i) w^{(t)}(x+i) \quad (5)$$

这里, $s^{(0)}$ 为原始信号, $s^{(t+1)}$ 为第 $t+1$ 次迭代平滑后的信号, $s_0 = \sum w^{(t)}(x+i)$, 对于等权平滑模板:

$$w^{(t)}(x+i) = 1.$$

(5) 式是对信号处处进行等权平滑,它不考虑是否是边缘。从图 2 中可以看到,在复平面上,实部和虚部均有可能出现黑白相间的条纹,这些边缘出现的地方往往是最终干涉条纹边缘出现的地方,滤波时,同样需要保持好这些边缘。但是注意到,此时数值的取值范围在 $(-\infty, +\infty)$ 之间,没有了所谓的缠绕现象。因此,对于实部和虚部可以分别采用基于梯度的自适应平滑算法^[11]。

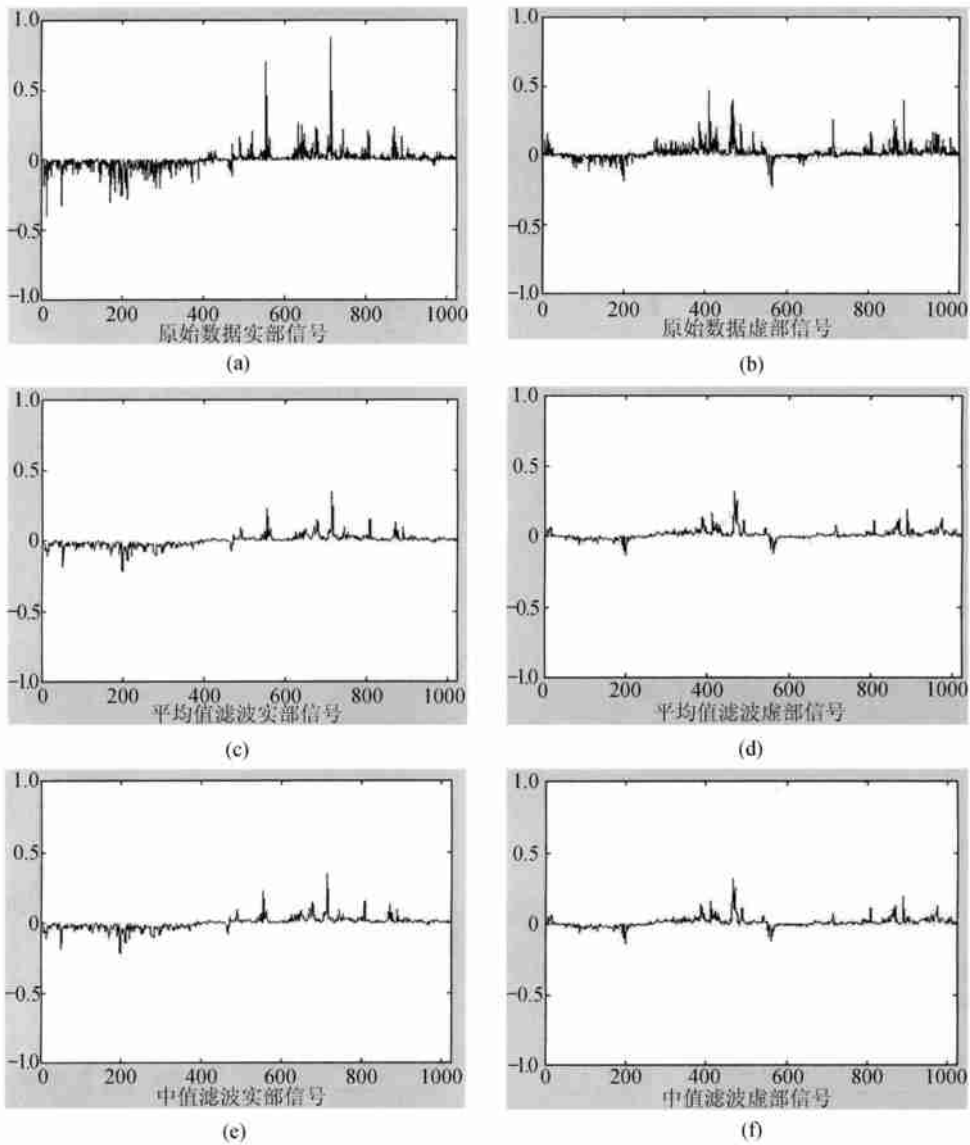


图 2 对应于图 1 滤波结果的实部和虚部分量

(a), (b) 为图 1(a) 原始干涉图的实部和虚部 (c), (d) 为图 1(c) 简单平滑后的实部和虚部 (e), (f) 为图 1(e) 中值滤波后的实部和虚部

Fig. 2 Real and Imaginary Component of the results in Fig. 1

从滤波的原理来看, 较之(5)式更合理的平滑应该是考虑到边缘, 在边缘处模板 $w^{(t)}(x)$ 中对应的权系数置为 0, 不进行平滑处理。注意到这里采用的是小窗口模板, 突变处分隔开的属于两个区域的点, 将不会同时被平均处理。对于突变处的点, 要求在平滑过程中把它归入其邻近的区域, 即增强了边缘。

突变位置的确定, 最常用的方法是根据信号的梯度来判断, 这样窗口的权系数作如下定义:

$$w^{(t)}(x) = \exp\left[-\frac{|s^{(t)'}(x)|^2}{2k^2}\right] \quad (6)$$

其中 $s^{(t)'}(x)$ 为信号 $s^{(t)}(x)$ 的一阶导数, 在二维处理时, 就是梯度。 k 是尺度函数, 它确定了在平滑过程中, 可以保留下的边缘幅度。如果信号梯度大于 k ,

则认为该点处于边缘上, 边缘点在滤波窗口对应的权系数减小, 使得边缘得以保留; 反之, 若信号梯度小于 k , 对应非边缘的点, 其权系数就变大, 在非边缘区域梯度低于 k 的窗口内各权系数接近, 较大程度上参与平滑, 将信号的不平坦平滑掉, 达到去除噪声的效果。

综合(5)和(6)两式, 推广至二维情况, 列出自适应平滑迭代算法的基本步骤如下:

(1) 计算梯度 $G_x(x, y)$ 和 $G_y(x, y)$:

$$G_x(x, y) = \frac{1}{2}[f(x+1, y) - f(x-1, y)] \quad (7a)$$

$$G_y(x, y) = \frac{1}{2}[f(x, y+1) - f(x, y-1)] \quad (7b)$$

(2) 计算滤波窗口权系数:

$$w(x, y) = \exp\left[-\frac{G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)}{2k^2}\right] \quad (8)$$

根据上述的讨论, 这里 k 的取值须根据边缘处的梯度的大小来确定。但是, 参数 k 的确定主要考虑使得突变的边缘得以保存, 因此, 不宜取得太大。例如, 可以按梯度最大值的 $1/3-1/2$ 来取。

(3) 对信号进行加权平均:

$$f^{(t+1)}(x, y) = \frac{\sum_{i=-1}^{+1} \sum_{j=-1}^{+1} f^{(t)}(x+i, y+j) w^{(t)}(x+i, y+j)}{\sum_{i=-1}^{+1} \sum_{j=-1}^{+1} w^{(t)}(x+i, y+j)} \quad (9)$$

这是一个迭代算法。不难证明, 该算法是收敛的^[11]。一般迭代 3—5 次就可以得出理想的效果。

3.3 中值滤波-自适应滤波二级去噪方案

在实际干涉条纹图中, 由于斑点噪声的存在, 往往有一些表现为毛刺状的噪声, 如图 1 和图 2 所示。从对应的剖面轮廓线图中, 可以看到一些明显的毛刺。比较图 1(b) 和图 2(d)、(f), 简单的平滑一定程度上抑制了这些噪声, 但不十分理想。这些噪声附近的梯度幅度很可能大于参数 k , 在自适应迭代平滑过程中被当作边缘保存起来, 由此而得出的相位也会出现毛刺。在进行自适应平滑之前, 必须去除毛刺的影响。

因此, 本文提出的整个去噪过程由两步完成: 首先分别在干涉影像的实部和虚部进行小窗口(如 3×3)的中值滤波, 然后进行 3.2 所述论的自适应迭代平滑。这里注意到中值滤波, 同样是在复数空间中进行, 以保证不破坏边缘处的相位分布。图 3 总结了中值-自适应滤波的基本步骤。

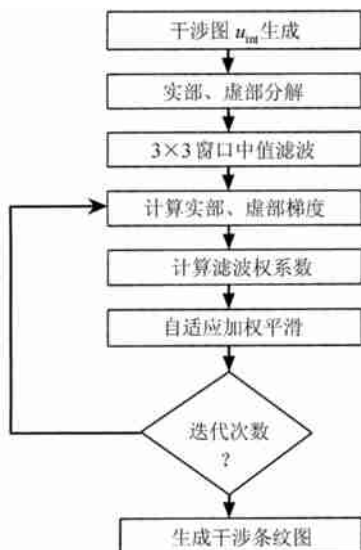


图 3 中值-自适应平滑滤波流程图

Fig. 3 Flowchart of the Median-adaptive smoothing filter

4 实验结果与分析

4.1 实验数据

选用 SIR-C 的 L 波段和 C 波段重复轨道 SLC 数据, 数据由 NASA/JPL 进行预处理, 原始数据为 CEOS 格式文件。本实验所用像对的成像时间分别为 1994 年 10 月 7 日和 8 日, 获取数据的时间间隔约为 1 天, 实验区为 Hawaii 的 Pu'u'o'o 岛。

原始的全景影像为 23000×5192 , 在实验时切取了一个典型实验区。大小为 2500×2500 像素, 有 C 和 L 波段两对影像。我们分别将 C 波段和 L 波段雷达影像经精确配准后生成干涉图作为滤波处理的实验数据, 该数据处理过程请参见文献[12]。本文只给出了 L 波段局部的干涉条纹图(如图 1(a)所示)和对应的处理结果。

4.2 平滑效果比较

图 1 和图 2 列出了两种常规的平滑滤波的处理结果。根据上一节提出的自适应方案进行了实验。在图 4 中, 左、右两列分别列出直接利用自适应平滑和中值-自适应滤波两种方法滤波的结果, 从中可以看出:

(1) 图 4 给出的结果均明显优于图 1、图 2 中的简单平滑滤波的结果, 更好地去除了噪声, 而且保持了相位波形的形状。

(2) 图 4 中, 直接用自适应滤波方法的结果, 虽然平滑效果很好, 但仍有一些毛刺难以去除。如果将 k 值取得比较大, 或许可以抑制掉毛刺, 但是也可能将一些突变幅度比较小的边缘也平滑掉了。而采用先做中值滤波, 再进行自适应平滑的处理方法, 从图 4 的(b)、(d)、(f)和(h)来看, 既很好地去掉了毛刺, 又达到了直接用自适应滤波的平滑效果。

4.3 平滑效果对相位解缠的影响

滤波效果的衡量还要考虑到对相位解缠的影响, 减少残余数(奇异点的个数)是其中的一个重要方面。这里用最基本的枝切法来测试自适应滤波前后的相位解缠效果。比较残余数, 枝切点数和孤立区的数量, 残余将导致枝切点数增加, 形成无法进行相位解缠的孤立区。因此, 这些数目应尽量减少。

表 1 列出了实验区中的 C 和 L 波段干涉图滤波前、后进行相位解缠时出现的残余数, 枝切点数和孤立区等的数量变化情况。从表 1 的结果来看, 经过中

值-自适应滤波后,效果非常明显。残余数,枝切点数和孤立区的数量均非常明显地减少了,不能成功解缠的区域极少。图 5 则进一步比较了由此提取的数字地面高程(斜距投影)的结果。图 5(a)、(c)中,滤波

前有大量的孤立区不能解出(图中黑色块状区域)。图 5(b)中只有少量的孤立区,而图 5(d)则几乎没有孤立区,全部区域均可以解缠。相位解缠所花的时间也至少节约了一倍。

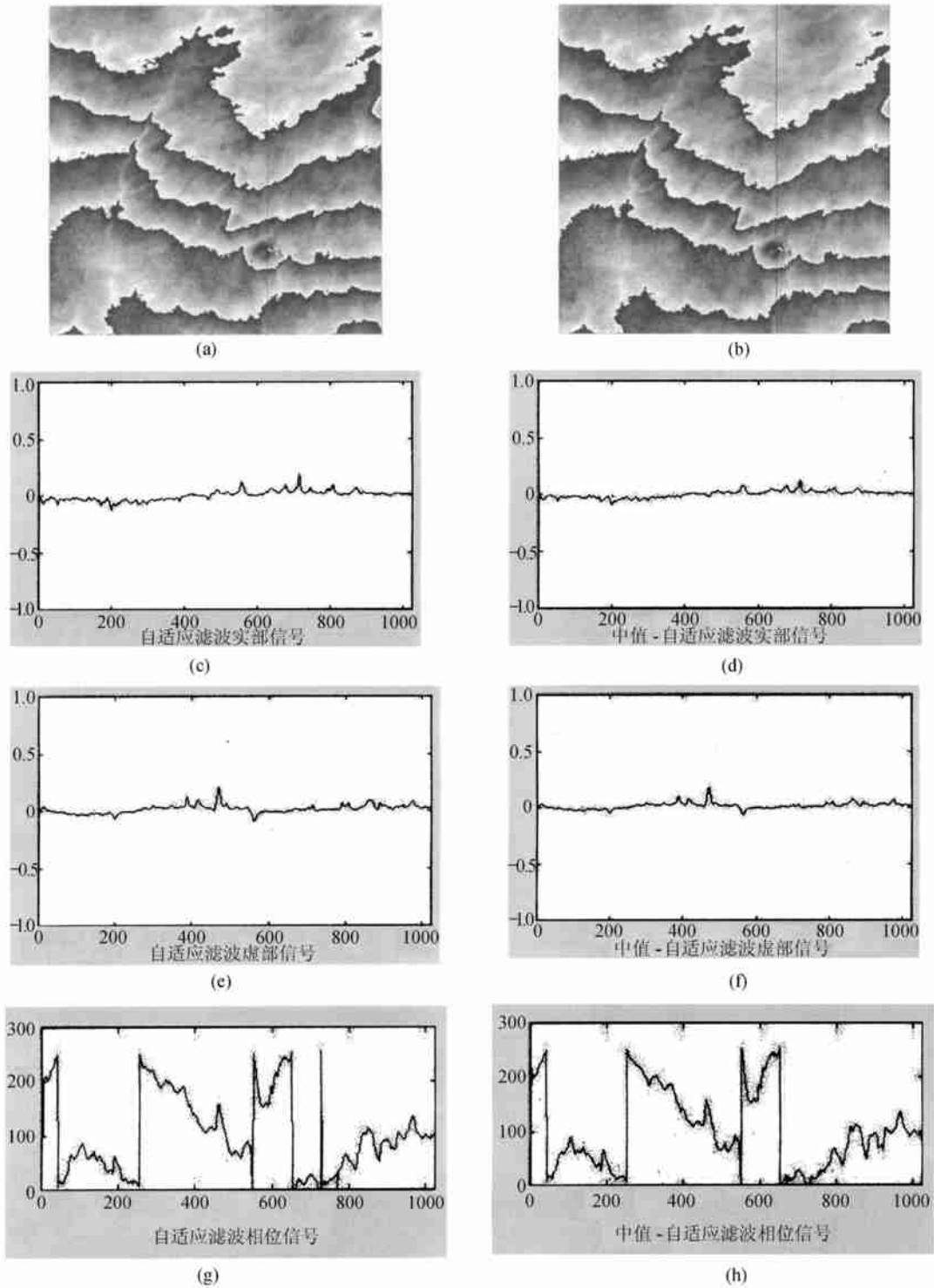


图 4 自适应滤波和 median-自适应滤波两种方法滤波的结果对比

Fig. 4 Comparison between the results from adaptive filter and Media-adaptive filter

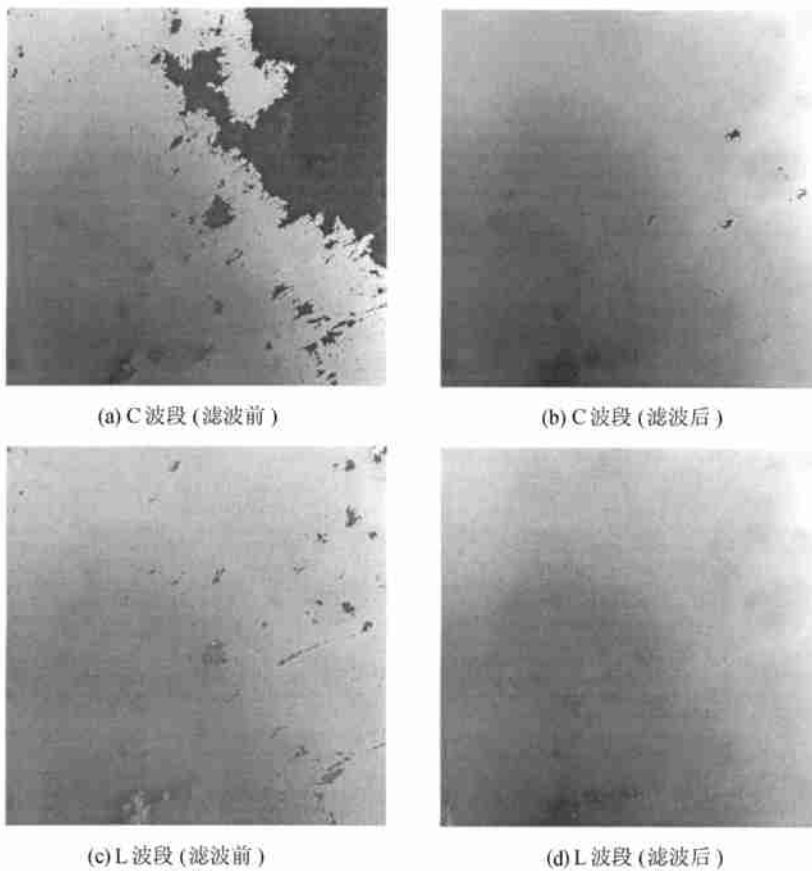


图 5 滤波前后相位解缠结果对比

Fig. 5 Comparison between the phase-unwrapping results from original and filtered interferogram

表 1 滤波前后相位解缠性能比较

Table 1 Residue numbers before and after phase-unwrapping

	残余点数/个	枝切点数/个	孤立区数/个
C 波段(滤波前)	563399	825535	40283
L 波段(滤波前)	254117	266549	7177
C 波段(滤波后)	2618	12082	407
L 波段(滤波后)	1222	4490	142

5 结 论

本文根据生成干涉条纹图的原理以及干涉图的特点,论述了去除干涉条纹图中噪声时所应考虑的几个值得注意的问题,指出了滤除干涉条纹图中噪声时处理的对象不应是条纹图(相位分量)本身,而应该在干涉影像的复数域进行。提出了在复数影像中进行中值-自适应平滑滤波的方法,能够有效地抑制干涉条纹图中的噪声,并可以很好地保持干涉条纹的边缘处的相位分布。实验结果验证了该方法在保持边缘

和相位解缠等方面的性能。

参 考 文 献 (References)

- [1] Toutin T, Gray L. State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2000, 55(1): 13-33.
- [2] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic Aperture Radar-System and Signal Processing [M]. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [3] Xu X, Liao M, Zhu P, et al. Study on Speckle Filtering of Single Look SAR Image [J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 1994, 24(4): 312-316. [徐新, 廖明生, 朱攀等. 单视数 SAR 图像 Speckle 滤波方法的研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(4): 312-316.]
- [4] Xu X, Liao M, Pu F. An Adaptive Method for Speckle Filtering of SAR Image Based on Local Relative Standard Deviation [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(3): 214-218. [徐新, 廖明生, 卜芳玲. 一种基于相对标准差的 SAR 图像 Speckle 滤波方法[J]. 遥感学报, 2000, 4(3): 214-218.]
- [5] Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite Radar Interferometry: Two-dimensional Phase Unwrapping [J]. *Radio Science*, 1988, 23(4): 713-720.
- [6] Ghiglia D C, Pritt M D. Two-Dimensional Phase Unwrapping-Theory, Algorithms, and Software [M]. New York: John Wiley & Sons, 1998.

- [7] Zhou X, Baird J P, Arnold J F. Fringe-orientation Estimation by Use of a Gaussian Gradient Filter and Neighboring-direction Averaging [J]. *Applied Optics*—IP, 1999, **38**(5): 795—804.
- [8] Yu Q, Liu X, Sun X. Generalized Spin Filtering and an Improved Derivative-sign Binary Image Method for the Extraction of Fringe Skeletons [J]. *Applied Optics*—IP, 1998, **37**(20): 4504—4509.
- [9] Lee J S, Papathanassiou K P, Ainsworth T L, *et al.* A New Technique for Noise Filtering of SAR Interferometric Phase Images [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1998, **36**(5) 1456—1465.
- [10] Trouvé E, Nicolas J, Maitre H. Improving Phase Unwrapping Techniques by the Use of Local Frequency Estimates [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1998, **36**(6): 1963—1972.
- [11] Zhen N. Computer Vision and Pattern Recognition [M]. Beijing: National Defense Science & Tech Press, 1998. [郑南宁, 计算机视觉与模式识别 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.]
- [12] Liao M, Zhang L, Zhang Z, *et al.* Automatic Registration for Repeat-track InSAR Data Processing [C], International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, Vol. XX XIII (Part B1): 186—192.

Adaptive Algorithm for Filtering Interferometric Phase Noise

LIAO Ming-sheng^{1,2}, LIN Hui¹, ZHANG Zu-xun², YANG Wen², ZHANG Li²

(1 Joint Lab. for Geoinformation Science, Chinese Univ. of Hong Kong; 2 Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: A new adaptive approach combined with Media filter and gradient-based adaptive filter is presented for removing the noise in the interferogram. Filtering phase noise in an interferogram is an important aspect in INSAR data processing. But any improper altering of the wrapped phase may influence the quality of derived DEM because the interferometric phase contains the topographic information. Therefore one of the difficulties in phase noise filtering is how to remove the noise and preserve the sharp sawtooth profile of the fringe effectively. The interferometric phase image behaves with the fringe in the form of modulus 2π wrapped phase. Filtering directly in interferogram may smooth the sharp edge of the sawtooth in the fringe and damage the unwrapped phase contribution. Some investigators have shown that the processing should not be conducted directly in the phase image, but in the complex plane. With the filtering presented in this paper is done in the complex plane before the phase image is formed by means of the arc tangent operator, i. e. in the real and imaginary component of the interferogram respectively.

The gradient-based filtering is an iterative algorithm. In the iteration, the moving window average with adaptive weight is conducted. The weight is varied with the gradient contribution of phase image. The less of the weight is corresponding to the larger gradient value so that the boundary of the fringe is not blurred. Additionally, the moving window is small to avoid the average of the phase values belonging to the different sides of the boundary. But the algorithm is not effective for the spike-like noise because it may also arise the great gradient and be treated as the boundary. To suppress the spike-like noise, the small window Media filtering is applied before the gradient-based average.

Compared with existing approach for phase noise filtering, the presented approach does not need complex procedure for the parameter estimation and are easy to be implemented. The effectiveness is verified with the interferogram generated from SIR-C/X-SAR repeat-pass INSAR data.

Key words: SAR; INSAR; filtering; adaptive algorithm; speckle