

小波 维纳组合滤波算法及其在 InSAR 干涉图去噪中的应用

蔡国林, 李永树, 刘国祥

西南交通大学 土木工程学院测量工程系, 四川 成都 610031

摘要: 为了提高 InSAR 干涉图的滤波质量, 在分析小波变换和维纳滤波各自优势的基础上, 提出并构造了一种小波 维纳组合滤波器, 实现了相应的滤波算法, 并开发了一套计算程序。为验证该算法的功效, 选取美国 Phoenix 局部地区作为实验区域, 使用 ERS-1/2 C 波段干涉图作为滤波原数据, 以视觉效果、相位导数标准偏差、奇异点个数以及数字高程模型精度作为评价指标, 并与其他两种典型滤波算法即小波软阈值法和 Goldstein 法进行了比较, 证实了小波 维纳组合滤波算法在干涉图去噪、保护边缘信息和精度等方面具有明显的优势。

关键词: InSAR 干涉图, 小波 维纳滤波, 算法, 评价

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A

1 引言

星载合成孔径雷达干涉技术 (synthetic aperture radar interferometry, 简称 InSAR) 已在地形制图与地表形变探测等方面表现出良好的应用前景, 其数据处理与分析的焦点是干涉相位图。然而, 由于受传感器热噪声、时间失相关、几何失相关、影像配准误差等因素的影响, 由覆盖同一地区的 2 幅 SAR 影像直接生成的干涉图中常常存在大量的噪声即奇异点 (residue), 这给相位解缠带来了很大的困难, 并可能造成解缠失败 (Ferretti et al. 1999; Bo 1999)。因此, 有必要对干涉图进行滤波, 以减少干涉图中的奇异点, 达到提高相位解缠结果精度和可靠性的目的。

针对干涉图相位噪声, 一些学者已提出了各种滤波方法, 较常见的有中值滤波、均值滤波、模数滤波、自适应滤波等 (Bo et al. 1999; Rodriguez & Martin, 1992; Lee 1998; 于晶涛 & 陈鹰, 2004)。中值滤波与均值滤波方法因未考虑相位的局部统计特性, 基于滤波窗口进行局部处理时, 容易造成边缘不连续; 自适应滤波方法 (包括维纳滤波), 虽然能够很好地利用相位的局部统计特性进行滤波, 但却未考虑干涉图的非平稳特性。此外, 这些算法没考虑干涉图中的乘性噪声, 且存在噪声抑制与分

辨率保持的矛盾。小波滤波是一个正在研究的热门课题, 已有学者将其引入到 InSAR 干涉图滤波中 (Braunisch et al. 2000; 赵艳明 & 全子一, 2004; Wang et al. 2005), 然而, 这些滤波算法理论上能获得很好的效果, 实际应用却并非如此, 其去噪的效果依赖于阈值的确定。鉴于单一算法的不足, 许多学者已开始研究如何利用各种算法的优势进行组合滤波, 并相继提出了一些新的滤波算法。这些组合滤波算法已在常规图像滤波中表现出良好的应用潜力 (赵艳明 & 全子一, 2004; 张泾周等, 2006), 在 InSAR 干涉图滤波方面, 汪鲁才等 (2005) 率先进行了有益的探索。

为进一步尝试组合滤波算法的功效并达到提高 InSAR 干涉图质量的目的, 本文提出一种基于小波 维纳滤波的 InSAR 干涉图滤波算法, 重点研究如何利用小波变换和维纳滤波二者的优势进行干涉图滤波。为检验该算法的有效性, 实验选用美国 Phoenix 地区真实 C 波段干涉图进行滤波与分析, 并与 2 种典型算法 (即小波软阈值滤波 (潘泉等, 2005) 与 Goldstein 滤波 (1998)) 的滤波效果进行对比分析。此外, 利用经小波 维纳滤波和这两种典型滤波算法所得到的 3 种干涉图分别计算出数字高程模型 (digital elevation model 简称 DEM), 并以美国宇航局提供的 SRTM DEM 作为评价标准, 对比分析各种算法对生成 DEM 的精度影响。

收稿日期: 2007-11-05; 修订日期: 2008-06-02

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划子课题 (编号: 2006BAJ05A13) 和国家自然科学基金项目 (编号: 40774004, 40374003)

第一作者简介: 蔡国林 (1978-) 男, 安徽东至人, 西南交通大学测量工程在读博士生, 主要从事 InSAR 理论及应用研究, 发表论文 4 篇。E-mail: caiguolin@163.com.

2 基于小波维纳滤波的干涉图滤波算法

2.1 基于多分辨小波变换的滤波思路

20世纪80年代, Mallat与 Meyer合作提出了多分辨分析 (multi-resolution analysis 简称 MRA) 的框架, 其主要思想是: 首先将 $L^2(R)$ ($L^2(R)$ 表示实数集合上平方可积函数的全体) 分解为一串具有不同分辨率的子空间序列; 然后将 $L^2(R)$ 中的对象 f 描述为具有一系列近似函数的逼近极限, 其中每一个近似函数都是 f 在不同分辨率子空间上的投影; 最后通过这些投影可以分析 f 在不同分辨率子空间上的性态和特征 (Mallat 1989)。

相对于其他常用方法, 利用小波变换算法进行 InSAR 干涉图滤波具有以下优势: (1) 小波系数的稀疏分布, 使得干涉图变换后的熵降低; (2) 由于采用了多分辨率方法, 可以非常好地刻画干涉图的非平稳特征, 如边缘、尖峰等, 以便于特征的提取与

保护; (3) 小波变换可对干涉图进行去相关, 可将乘性噪声 (一般由信道不理想引起, 它们与信号的关系是相乘, 即信号在它, 信号不在它也不在) 转换成加性噪声 (一般指热噪声、散弹噪声等, 它们与信号的关系是相加, 不管有没有信号, 噪声都存在), 且噪声在变换后有白化趋势, 所以在小波域比在时域和空域更利于去噪。

InSAR 干涉图可被看作一个复数矩阵, 使用 Mallat等提出的小波算法进行滤波, 其过程如下:

- (1) 首先获取干涉图的实部和虚部。
- (2) 对 InSAR 干涉图的实部或虚部进行多分辨小波分解 (这里以 3 个尺度为例), 其流程见图 1。其中: LL, HH, VV, DD 分别表示干涉图经小波分解后的低频分量和水平、垂直、对角线高频分量。
- (3) 对高频系数进行处理, 剔除被噪声污染的小波系数。
- (4) 进行小波系数重构, 得到干涉图实部或虚部的最优估计, 其流程见图 1。
- (5) 组合实部和虚部得到处理后的干涉图。

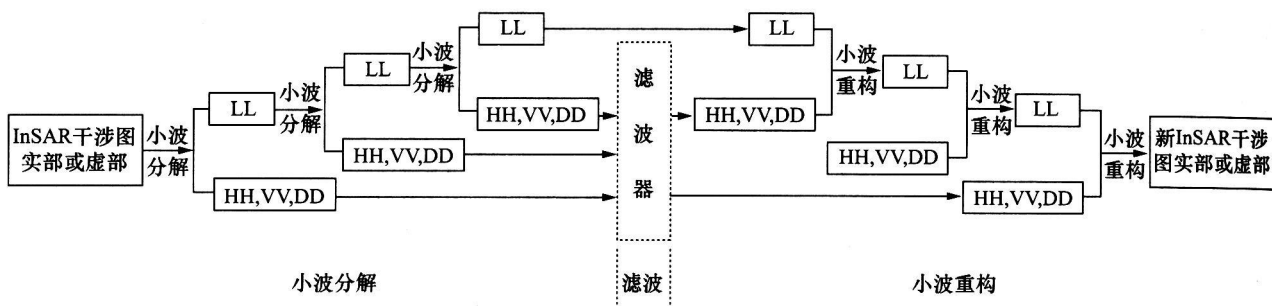


图 1 小波分解与重构的滤波流程图

Fig 1 Flow chart of filtering based on wavelet decomposition and reconstruction

2.2 维纳滤波器

维纳滤波器以加性噪声且信号和噪声均为平稳随机过程为前提, 以最小均方误差为准则, 在最小均方误差意义上具有最优性能, 是经典的去高斯白噪声方法。

设有用信号 x 被独立同分布的加性高斯白噪声 w 污染, 观察到的含噪信号为 y 即:

$$y = x + w \quad (1)$$

维纳滤波后求得 x 的估计值为 \hat{x}

$$\hat{x} = Hy \quad (2)$$

式中, H 为维纳滤波器, 要使最小均方误差最小, H 应满足:

$$H \begin{pmatrix} w_1, w_2 \end{pmatrix} = \frac{P_x}{P_y} \begin{pmatrix} w_1, w_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中, $p_y(w_1, w_2)$ 是含噪信号 y 的自相关函数的傅里叶变换; $p_x(w_1, w_2)$ 是有用信号 x 和含噪信号 y 的互相关函数的傅里叶变换。从式 (3) 可知, 维纳滤波器的设计步骤如下 (徐飞 & 施晓红, 2002):

- ① 求取含噪信号 y 的自相关函数, 并计算其傅里叶变换, 得到 $p_y(w_1, w_2)$ 。
- ② 求取含噪信号 y 与有用信号 x 的互相关函数, 并计算其傅里叶变换, 得到 $p_x(w_1, w_2)$ 。
- ③ 利用 (3) 式求取维纳滤波器 $H(w_1, w_2)$ 。

2.3 小波 维纳滤波器构造及滤波策略

维纳滤波利用数字信号的统计规律滤波,对加性白噪声非常有效,但由于以下两方面原因,使得直接将其用于 InSAR干涉图滤波难以取得好的效果(王大凯 & 彭进业, 2006): (1) 干涉图中既有加性噪声,也有乘性噪声; (2) 它的最优化准则是最小均方误差,即维纳滤波器是一个低通滤波器,容易导致原本锐利的边缘趋向模糊化。结合 2.1节可知,小波变换算法和维纳滤波具有很好的互补性,即可将小波变换

的低熵、多分辨率及去相关优势与维纳滤波的最小均方误差统计特性结合进行滤波。

基于此,本文尝试将小波变换和维纳滤波结合,利用两路维纳滤波和三路小波变换实现基于小波 维纳滤波器的 InSAR干涉图滤波(包括小波 维纳滤波器的设计)。因为有用信号 x 是未知的,我们用含噪信号 y 经维纳滤波得到的信号 x_c (维纳滤波后,噪声在一定程度上得到了抑制,可认为 x_c 近似于有用信号 x) 替代 2.2节中的有用信号 x 。流程见图 2。

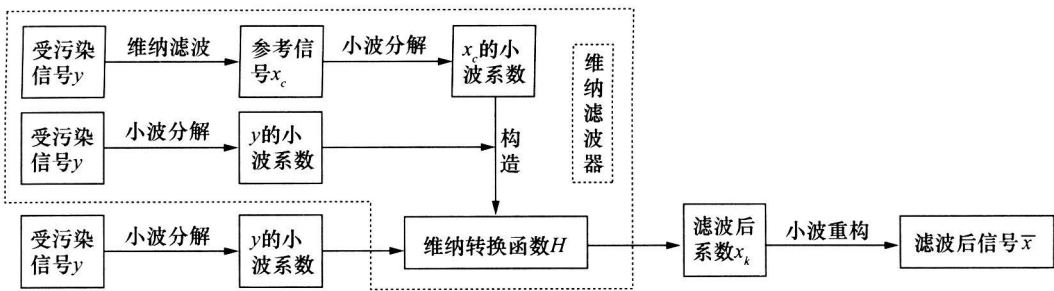


图 2 小波 维纳滤波器滤波流程

Fig 2 Filter-flow of wavelet Wiener filter

采用上述小波 维纳滤波算法对 InSAR干涉图滤波,我们设计了如下策略:

- (1) 首先从干涉图中取出实部和虚部,形成 2 个矩阵。
- (2) 用维纳滤波函数 (5×5 的窗口) 对受污染的信号 y 进行滤波,得到参考信号 x_c 。
- (3) 对参考信号 x_c 进行小波分解,本文使用 sym^4 小波进行 3 层分解。
- (4) 对受污染信号 y 按步骤 (3) 进行小波分解。
- (5) 将步骤 (3)、(4) 得到的高频系数按 2.2 节构造各尺度各方向的维纳转换函数 H 。
- (6) 利用步骤 (5) 构造的转换函数 H 处理经步骤 (4) 所提取的高频系数,得到滤波后的高频系数 x_k 。
- (7) 对步骤 (4) 得到的低频系数和步骤 (6) 得到的高频系数进行重构,得到滤波后的信号。
- (8) 最后对经过处理的实部和虚部数据进行组合,形成滤波后的干涉图。

3 滤波实验与算法评价

3.1 实验数据与滤波评价指标

根据第 2 节所述算法,编写了相应的 Matlab 小波 维纳滤波程序。为了检验该算法对加性噪声和乘性噪声的功效,我们选用去平地效应后的 InSAR干涉图作为滤波对象。因为 InSAR干涉图中既包含 InSAR 系统

本身的热噪声、数据处理引起的盐糊噪声和高斯噪声,即加性噪声,又含有时空失相关引起的噪声及雷达回波信号衰弱引起的斑点噪声(乘性噪声)(汪鲁才等, 2005; 魏钟铨, 2001),能够确保滤波的典型性与方法比较的公平性。实验以美国 Phoenix 局部地区作为研究区域,使用 ERS-1/2 的 2 幅 C 波段(雷达波长为 5.6 cm) SAR 复数影像(其中: ERS-1 SAR 成像时间为 1995-11-05, ERS-2 SAR 为 1995-11-06)所生成的干涉图作为滤波原数据。滤波分析的焦点集中在一个典型区域,相应的影像块大小为 800×1000 像素。此外,为检验滤波的最终功效,还选用了美国宇航局所提供的 SRTM-1 DEM(即 1 arc second DEM,其水平基准面是 WGS84 椭球模型,绝对水平和高程精度分别为 20m 和 16m (Farr & Kobrick, 2000) 作为评价的参考标准。

实验不仅分析所提出的小波 维纳滤波算法对干涉图滤波的效果,还将与 2 种典型算法(小波软阈值滤波算法(潘泉等, 2005)、Goldstein(1998)滤波算法)的滤波效果进行比较。其中 Goldstein 滤波的原理是:首先确定一大小为 $[SIZE, SIZE]$ 的窗口,在干涉图上滑动该窗口时,利用快速傅里叶变换将窗口内的值转化到频率域,然后对频域内的对应值进行加权卷积,最后经反变换得到滤波后的干涉图。这种滤波方法对相位噪声和相位梯度很敏感,因而能较好地保护影像特征信息。小波软阈值滤波则是先将信号变换到频率域,然后对不同尺度上的小波系数选取一合适阈值,如果小波系

数大于该阈值,予以保留,反之置为零。潘泉等(2005)显示小波软阈值方法在有效滤波的同时也能很好地避免影像特征信息的损失。值得补充说明的是,经实验可知,汪鲁才等(2005)提出的小波中值滤波算法与小波软阈值滤波算法的滤波效果相当,限于篇幅,我们仅选择小波软阈值滤波算法进行比较分析。

所选取的滤波结果评价指标包括图像视觉效果、相位导数标准偏差图、相位导数标准偏差统计直方图、奇异点(Ghiglia & Pritt 1998)个数(奇异点越少,干涉图质量越好)。其中,相位导数标准偏差定义如下(Ghiglia & Pritt 1998):

$$z_{m,n} = \frac{\sqrt{\sum (\Delta_{x_i} - \overline{\Delta_{x_m}})^2} + \sqrt{\sum (\Delta_{y_i} - \overline{\Delta_{y_m}})^2}}{k} \quad (4)$$

式中, Δ_{x_i} , Δ_{y_i} 分别是干涉图沿 x , y 方向的梯度值; $\overline{\Delta_{x_m}}$, $\overline{\Delta_{y_m}}$ 分别是 $k \times k$ 窗口内的 x , y 方向的梯度均值; $z_{m,n}$ 是窗口中心的相位导数标准偏差值。相位导数标准偏差被认为是直接评价干涉图质量

的有效测度(Ghiglia & Pritt 1998),其值越大,说明干涉图质量越差。此外,我们利用上述3种滤波算法所得到的3种干涉图分别计算出DEM,并以SRTM DEM作为评价标准,对比分析3种DEM的精度差异。

3.2 实验结果及对比分析

图3(a)显示了美国Phoenix地区的原始干涉图,图3(b)~(d)分别显示了小波软阈值滤波、Goldstein滤波(令 $\alpha=0.5$, $\text{overlap}=4$, $\text{blocksize}=32$, $\text{kemel}=[5 \ 1 \ 2 \ 3 \ 2 \ 1]$,具体参数的意义见Goldstein & Werner(1998)和本文提出的小波-维纳滤波的干涉图滤波结果;图4(a)~(d)显示了与图3(a)~(d)一一对应的相位导数标准偏差图,其值与颜色条对应,值越大,说明干涉相位质量越差;图5显示了与图4(a)~(d)对应的相位导数标准偏差统计结果,值越小,则干涉图的质量越好;图3中4种干涉图的奇异点数统计结果如表1。

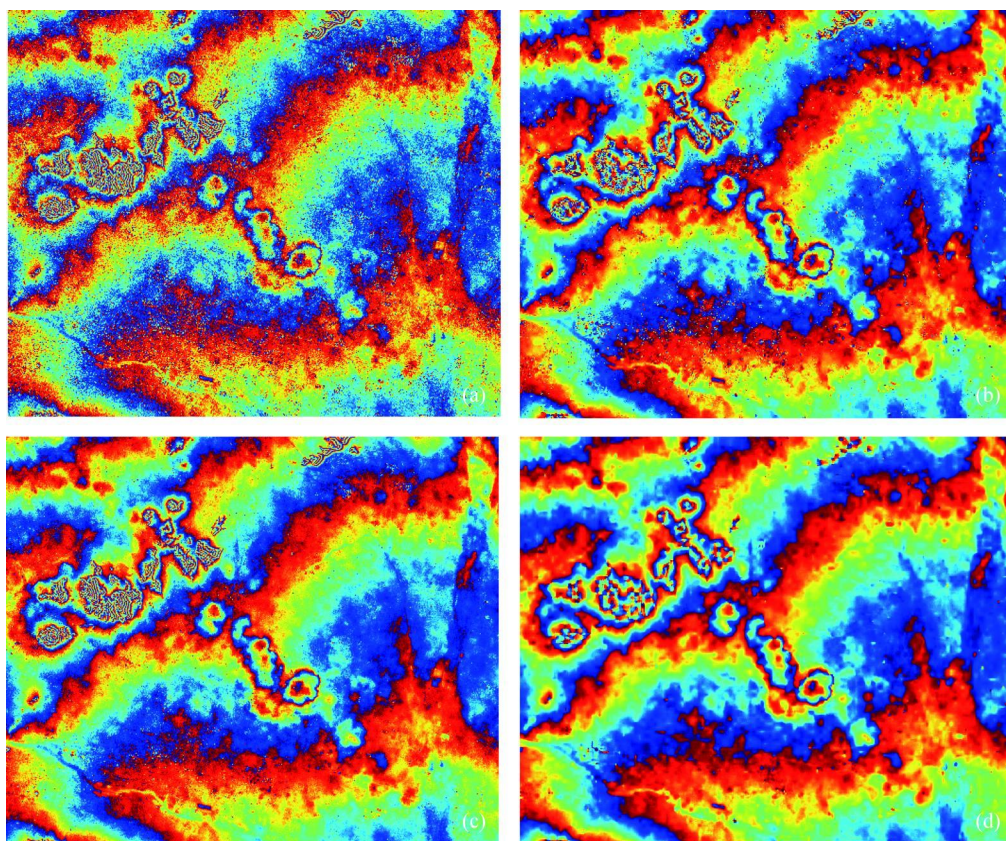


图3 美国Phoenix地区原始干涉相位图与3种滤波结果

(a)原始干涉相位图;(b)小波软阈值滤波干涉图;(c)Goldstein滤波干涉图;(d)小波-维纳滤波干涉图

Fig. 3 Original interferogram and its filtered versions by 3 methods over Phoenix, USA

(a) an original interferogram; (b) an interferogram by Wavelet soft-threshold filter

(c) an interferogram by Goldstein filter; (d) an interferogram by WWC filter

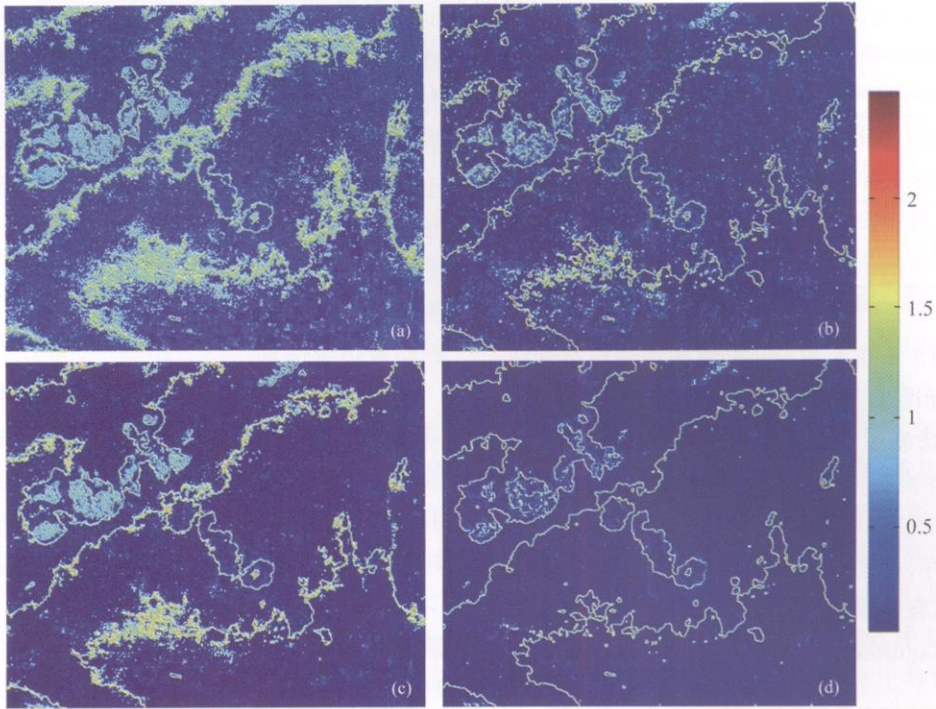


图 4 Phoenix 地区干涉图相位导数标准偏差比较

(a) 原始相位导数标准偏差图;(b) 小波软阈值滤波后相位导数标准偏差图;

(c) Goldstein 滤波后相位导数标准偏差图;(d) 小波-维纳滤波后相位导数标准偏差图

Fig.4 Comparison of phase-derivative standard deviation over Phoenix, USA

(a) original PSDS;(b) PSDS by Wavelet soft-threshold filter;(c) PSDS by Goldstein filter;(d) PSDS by WWC filter

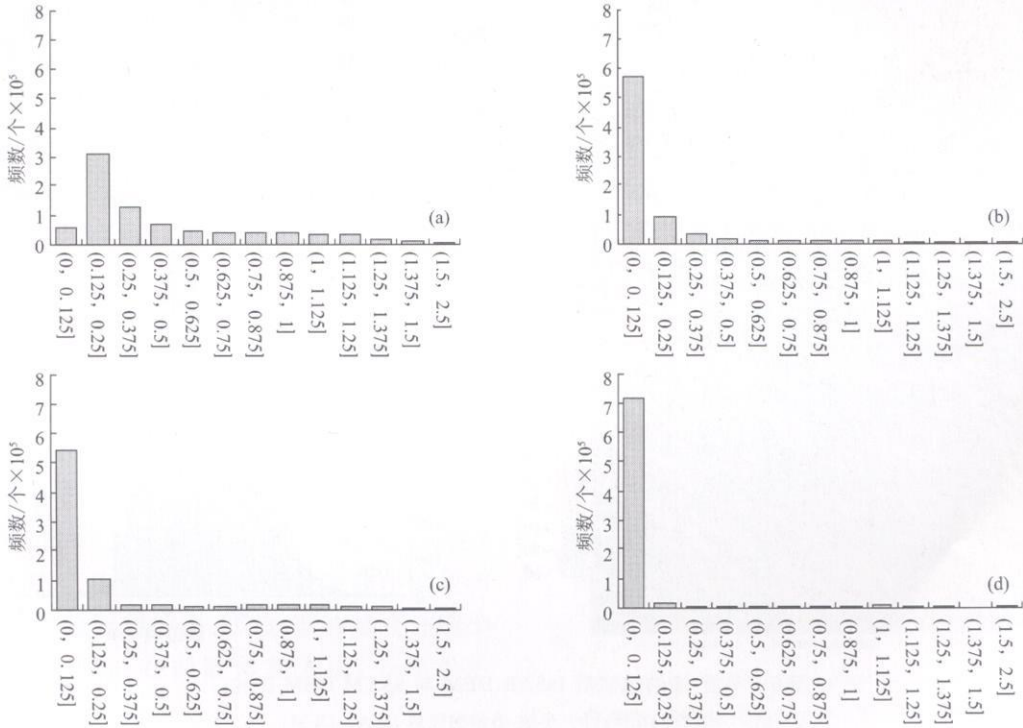


图 5 Phoenix 地区干涉图相位导数标准偏差统计

(a) 原始相位导数标准偏差统计;(b) 小波软阈值滤波后相位导数标准偏差统计;

(c) Goldstein 滤波后相位导数标准偏差统计;(d) 小波-维纳滤波后相位导数标准偏差统计

Fig.5 Stat. of phase-derivative standard deviation over Phoenix, USA

(a) Stat. of original PSDS;(b) Stat. of PSDS by Wavelet soft-threshold filter;

(c) Stat. of PSDS by Goldstein filter;(d) Stat. of PSDS by WWC filter

表 1 3种滤波方法的奇异点指数对比 (Phoenix地区)

Table 1 Comparison of the number of residues for three filters (Phoenix)

	原始干涉图	小波软阈值滤波干涉图	Goldstein滤波干涉图	小波维纳滤波干涉图
相位奇异点个数	197310	58738	84829	26520

从图 3—图 5不难看出,小波维纳滤波在视觉效果和相位导数标准偏差两方面均优于小波软阈值滤波及 Goldstein滤波。主要原因在于 Goldstein滤波利用快速傅里叶变换将含噪信号变换到频域,然后进行滤波。当干涉图中信号和噪声的频带相互分离时,这种方法效果很好,但当信号和噪声的频带相互重叠(譬如信号中混有白噪声)时,滤波效果较差,即基于傅里叶变换的 Goldstein滤波存在保护信号局部性与

抑制噪声的矛盾。小波变换具有良好的时频局部化性质,但基于小波软阈值算法的干涉图滤波,其效果与滤波过程中的阈值确定有关,阈值过小,造成滤波效果不佳,阈值过大,又会造成图像的过渡平滑。而小波维纳滤波算法很好地利用了小波变换(具有良好的时频局部化性质)和维纳滤波(利用数字信号的统计规律去噪)的优点,将二者有机地结合起来进行去噪,既能有效去除干涉图中的噪声,又能很好地保护图像边缘信息。

对 3种滤波干涉图所对应的相位导数标准偏差(图 5)进行统计可知,位于 $[0, 0.5]$ 区间内的像素个数分别为:小波维纳滤波 753510个、小波软阈值滤波 712860个、Goldstein滤波 687780个。在奇异点指数减少量方面(表 1):小波软阈值滤波、Goldstein滤波分别是 70.23%, 57.01%, 而小波维纳滤波为 86.56%。

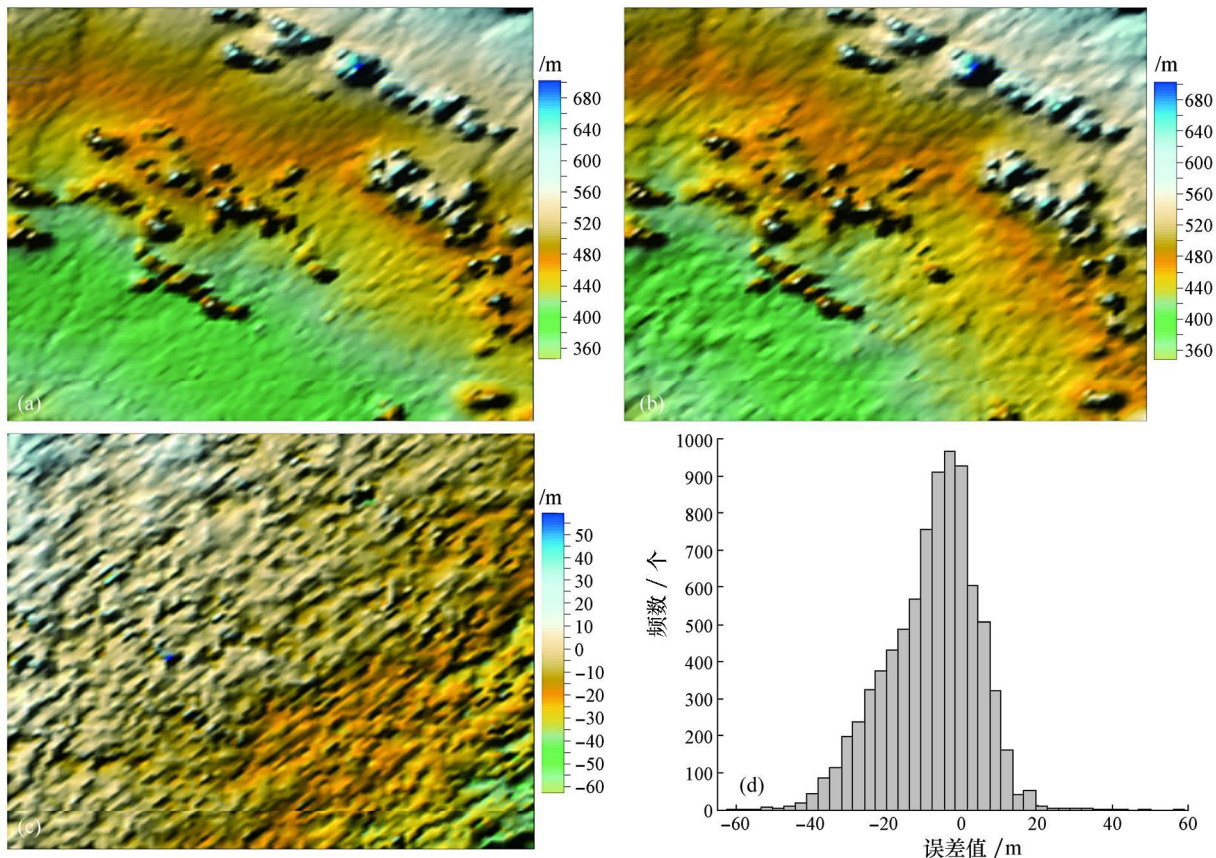


图 6 小波维纳滤波后 InSAR DEM 与 SRTM DEM 比较

(a) SRTM DEM; (b) 小波维纳滤波后 InSAR DEM;

(c) SRTM DEM 与 InSAR DEM 高程差异; (d) SRTM DEM 与 InSAR DEM 高程误差统计直方图

Fig 6 Comparison of SRTM DEM and InSAR DEM that filtered by the WWF

(a) SRTM DEM; (b) InSAR DEM by WWF filter

(c) elevation difference between SRTM DEM and InSAR DEM;

(d) Stat. of elevation error between SRTM DEM and InSAR DEM

为从 DEM 精度方面检验 3 种滤波算法的效果,本文将滤波后提取的 InSAR DEM 与 SRTM DEM 进行差值统计分析,对比分析各种算法对生成 DEM 的精度影响。由于 InSAR 是一种相对测量技术,其提取的 DEM 存在 2 个问题:(1)不是绝对高程。(2)与 SRTM DEM 上的同名点在坐标上有一定偏移。为控制截取误差,我们首先将 InSAR DEM 与 SRTM DEM 进行同名点匹配,并从 InSAR DEM 和 SRTM DEM 上裁减同一区域(截取的 SRTM DEM 位于北纬 $[33.56^{\circ}, 33.76^{\circ}]$ 和东经 $[-112.17^{\circ}, -112.02^{\circ}]$ 之间,海拔在区间 $[347 \text{ m}, 702 \text{ m}]$ 内,均值为 461 m);然后对截取的 DEM 重采样,使它们的采样间隔一致,并计算 2 个 DEM 的中值,将 InSAR DEM 高程改正到绝对高程上;最后进行差值统计分析。

图 6(a), (b)分别为 SRTM DEM 和经小波 维纳滤波后提取的 InSAR DEM (限于篇幅,本文仅列出经小波 维纳滤波后提取的 InSAR DEM 与 SRTM DEM 的比较图),图 6(c)为两个 DEM 的高程差异图,图 6(d)为图 6(c)的统计直方图。表 2 为经上述 3 种滤波后提取的 InSAR DEM 与 SRTM DEM 差值统计结果。

表 2 3 种滤波方法的 InSAR DEM 与 SRTM DEM 差值统计 (Phoenix 地区)

Table 2 Stat of the difference of InSAR DEM and SRTM DEM for three filters (Phoenix)

	小波软阈 值滤波	Goldstein 滤波	小波 维纳 滤波
均值绝对值 /m	3.56	4.53	3.45
标准偏差 /m	12.09	12.41	11.59

从图 6(a), (b), (c)可以看出,经小波 维纳滤波后提取的 InSAR DEM 与 SRTM DEM 较一致;对图 6(c)的统计可知:高程差异值位于 $[-20 \text{ m}, 20 \text{ m}]$ 之间的占 99.71%,且离散度小(图 6(d))。从表 2 的统计结果可知,相对于 Goldstein 滤波和小波软阈值滤波,在均值绝对值方面,小波 维纳滤波分别少了 1.08 m 和 0.11 m ;在标准偏差方面,分别少了 0.82 m 和 0.50 m 。

综合图像视觉效果、相位导数标准偏差图、相位导数标准偏差统计直方图、奇异点数、InSAR DEM 精度 5 项评价指标可知,在 InSAR 干涉图滤波中,小波 维纳滤波算法明显优于 Goldstein 滤波算法和小波软阈值滤波算法。

4 结 论

本文将小波变换算法与维纳滤波结合,提出了一种对加性噪声和乘性噪声均有效的小波 维纳组合滤波器,重点研究了如何利用小波变换的低熵、多分辨分析、去相关等优势及维纳滤波的最小均方误差统计特性进行干涉图滤波,实现了相应的滤波算法并编写了一套计算程序。为验证该算法的有效性,实验选用既含有加性噪声又含有乘性噪声的 ERS-1/2 C 波段干涉图(焦点集中在美国 Phoenix 地区的一个典型区域,相应的影像块大小为 800×1000 像素)作为滤波原数据,以视觉效果、相位导数标准偏差、奇异点数及 DEM 精度作为评价指标,并与小波软阈值滤波和 Goldstein 滤波进行了对比分析,证实了小波 维纳组合滤波算法对干涉图滤波的有效性和优越性。通过实验对比分析,得出如下具体结论:

(1)从图像视觉效果、相位导数标准偏差可知,小波 维纳滤波算法能有效去除干涉图中的噪声,且在相位导数标准偏差值 (< 0.5) 和奇异点减少量两方面:小波 维纳滤波分别为 753510 个和 86.56%,小波软阈值滤波分别为 712860 个和 70.23%,Goldstein 滤波分别为 687780 个和 57.01%。对干涉图的分析显示,相对于另外 2 种算法,小波 维纳滤波算法在去噪、保护边缘信息方面的优势更加明显。

(2)从 DEM 精度比较可知,经小波 维纳滤波后提取的 InSAR DEM 质量较高,且在与 SRTM DEM 差值的均值绝对值和标准差两方面:小波 维纳滤波分别为 3.45 m 和 11.59 m ,小波软阈值滤波分别为 3.56 m 和 12.09 m ,Goldstein 滤波分别为 4.53 m 和 12.41 m 。对 DEM 精度的分析表明,小波 维纳滤波方法能在一定程度上改善 InSAR DEM 的精度。

REFERENCES

- Bo G, Dellepiane S, Beneventano G. 1999. A locally adaptive approach for interferometric phase noise reduction. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS Proceedings IEEE 1999 International 1: 264-266
- Braunisch H, Wu B, Kong J A. 2000. Phase unwrapping of SAR interferograms after wavelet denoising. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS Proceedings IEEE 2000 International 2: 752-754
- Farr T G, Kobrick M. 2000. Shuttle Radar topography mission

- produces a wealth of data. EOS Transactions American Geophysical Union, **81**: 583–585
- Ferretti A, Claudio P, Fabio R. 1999. Multibaseline InSAR DEM reconstruction: the wavelet approach. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **37**(2): 705–715
- Ghiglia D C, Pritt M D. 1998. Two-Dimensional phase unwrapping theory: Algorithms and software. John Wiley & Sons, Inc
- Goldstein R M, Werner C L. 1998. Radar interferogram filtering for geophysical applications. Geophysical Research Letters, **25**(21): 4035–4038
- Lee J S. 1998. A new technique for noise filtering of SAR interferometric phase images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **36**(5): 258–263
- Mallat S. 1989. Theory from multi-resolution signal decomposition: the wavelet representation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **11**(7): 674–693
- Pan Q, Zhang L, Meng J L, et al. 2005. The wavelet filter and its application. Beijing: Publishing House of Tsinghua University
- Rodriguez E, Martin J M. 1992. Theory and design of interferometric synthetic aperture radar. IEEE Proceedings-F, **139**(2): 147–159
- Wang D K, Peng J Y. 2006. Wavelet analysis and its application on processing signal. Beijing: Publishing House of Electronics Industry
- Wang L C, Wang Y N, Mao L P. 2005. An algorithm of interferometric phase filter of InSAR based on wavelet analysis and median filter algorithm. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, **34**(2): 108–112
- Wei Z Q. 2001. Synthetic aperture radar satellite. Beijing: Science Press
- Xu F, Shi X H. 2002. The application of matlab on image processing. Xi'an: Publishing House of Xi'an Electronic Science and Technology University
- Yu J T, Chen Y. 2004. A new filter on interferogram fringe. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, **33**(2): 121–126
- Zhang J Z, Zhang G L, Dai G Z. 2006. The application of adaptive algorithm and wavelet transform in the filtering of ECG signal. J Biomed Eng., **23**(5): 977–980
- Zhao Y M, Quan Z Y. 2004. An efficient wavelet Wiener denoising algorithm. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, **27**(4): 41–45

附中文参考文献

- 潘泉, 张磊, 孟晋雨等. 2005. 小波滤波方法及应用. 北京: 清华大学出版社
- 汪鲁才, 王耀南, 毛六平. 2005. 基于小波变换和中值滤波的 InSAR 干涉图像滤波方法. 测绘学报, **34**(2): 108–112
- 王大凯, 彭进业. 2006. 小波分析及其在信号处理中的应用. 北京: 电子工业出版社
- 魏钟铨. 2001. 合成孔径雷达卫星. 北京: 科学出版社
- 徐飞, 施晓红. 2002. Matlab 应用图像处理. 西安: 西安电子科技大学出版社
- 于晶涛, 陈鹰. 2004. 一种新的 InSAR 干涉条纹图滤波方法. 测绘学报, **33**(2): 121–126
- 张泾周, 张光磊, 戴冠中. 2006. 自适应算法与小波变换在心电信号滤波中的应用. 生物医学工程学杂志, **23**(5): 977–980
- 赵艳明, 全子一. 2004. 一种有效的小波 Wiener 滤波去噪算法. 北京邮电大学学报, **27**(4): 41–45

Wavelet Wiener combined filter and its application on InSAR interferogram

CAI Guo-lin, LI Yong-shu, LIU Guo-xiang

Department of Surveying Engineering, Southwest Jiaotong University, Sichuan Chengdu 610031, China

Abstract In order to raise signal-to-noise ratio (SNR) of InSAR interferograms, this paper proposes a Wavelet Wiener combined (WWC) filter in view of the respective merits of Wavelet transform and Wiener filter. The WWC algorithm and its computer program are developed to raise SNR of interferograms. To validate the proposed filter, the localized area around Phoenix in Arizona of USA is selected as the testing site and the ERS-1/2 C-band interferogram is utilized as the source data for filtering. Several indicators, including visualization effect, standard deviation of phase derivatives, number of residues and accuracy in DEM derived interferometrically, are taken into account to assess the effectiveness of this filter. The tested results show that WWC filter has some prominent advantages in terms of denoising, edge protection and improving DEM accuracy, if compared with two typical approaches presented previously, i.e., Wavelet soft-threshold filter and Goldstein filter.

Key words InSAR interferogram, wavelet-Wiener filter algorithm, assessment