

doi:10.3969/j.issn.1001-2400.2010.02.012

自适应的改进 Goldstein 干涉相位图滤波算法

严卫东^{1,2}, 倪维平², 赵亦工¹, 芦颖², 吴俊政²

(1. 西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 在 Goldstein 的合成孔径雷达干涉测量干涉相位图滤波算法基础上, 构造了一种自适应的域加权系数来取代原先人工设定的经验值, 并以局部相干系数计算其幂指数, 解决了原算法在面对复杂干涉条纹图时, 由于均采用一致性处理而导致的过滤波和欠滤波问题. 仿真数据和实际 ERS 数据处理结果表明, 改进算法在显著降低干涉相位噪声的同时, 也很好保持了相位分辨率.

关键词: 遥感; 自适应滤波; Goldstein 算法; SAR 干涉测量; 频域加权函数

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2010)02-0248-06

Auto-adaptive filtering of the InSAR interferometric phase based on the modification Goldstein algorithm

YAN Wei-dong^{1,2}, NI Wei-ping², ZHAO Yi-gong¹, LU Ying², WU Jun-zheng²

(1. School of Electronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Based on the Goldstein algorithm for InSAR interferometric phase filtering, an auto-adaptive spectrum weight function is constructed in place of the original fixed value ascertained artificially, and its exponential power parameter is calculated by the local coherence. Over filtering and under filtering problems are solved when processing the complex interferometric stripes caused by the uniform filtering. Experimental results from simulated data and ERS data indicate the validity of the modification algorithm, with good denoising effect and nice preserving of the phase resolution.

Key Words: remote sensing; auto-adaptive filtering; Goldstein algorithm; interferometric synthetic aperture radar; spectrum weight function

合成孔径雷达干涉测量(InSAR)通过对接收天线多路散射回波数据的干涉处理来获取高精度的地面数字高程模型(DEM)或地表形变信息, 同时也可实现对洋流的监测以及对地面运动目标的检测和定位, 并具有全天时、全天候、低成本等优点, 已成为当今雷达成像和对地观测中最具竞争力的技术之一^[1-2].

多年来, 人们提出了很多方法来提高 InSAR 的测量精度和稳定可靠性, 但至今仍有一些问题没有很好解决, 从而制约了 InSAR 的技术发展和应用拓展^[1-2]. 相位干涉图质量是决定干涉测量精度的关键因素之一, 实际生成的干涉相位图含有大量噪声, 这对于相位解缠、DEM 重建等 InSAR 后续处理极为不利, 必须采取适当滤波进行消除. 因此, 干涉相位图滤波是 InSAR 数据处理中非常关键的一个技术环节.

InSAR 干涉相位图的滤波方法有很多种^[3-9]. 空域滤波基于传统的光学图像滤波算法, 由于没有考虑相位图的实际意义以及方向性和疏密度变化, 滤波效果不佳; 自适应滤波能较好地保持和增强干涉图中的条纹信息, 但处理过程要先对方向窗口中的像元进行相位展开, 实现较为复杂; 多视滤波是对广义干涉图相邻图像相邻像元的复数值进行平均, 处理效果与多视数和图像的相干性有关; 矢量滤波先将原始干涉相位变换到

收稿日期: 2008-12-19

基金项目: 国家部委科技预研资助项目(413300501, 513310103)

作者简介: 严卫东(1967-), 男, 副研究员, 博士, E-mail: yanwdxan@sina.com.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

矢量空间后再进行局部平均,对条纹质量很差和条纹密集的区域难以取得较好的滤波效果。

对该问题的处理目前更倾向于采用频域滤波技术,虽然其中有很多方法均能有效抑制噪声,但同时也使相位分辨率明显下降^[4]。Goldstein 和 Werner 提出了一种频域加权的滤波方法^[7-8],效果较好,但该算法中的加权因子需由经验设定,对干涉条纹比较复杂的相位图的处理效果并不好。笔者在深入剖析 Goldstein 算法的基础上,分析研究了干涉相位图质量与复相干系数之间的关系,构造了一种自适应的频域加权系数及其幂指数计算方法,对 Goldstein 算法进行改进,并利用仿真数据和实际 ERS 数据进行了有效性验证。

1 Goldstein 干涉相位图滤波算法

Goldstein 滤波算法的处理过程如下^[7]:

步骤 1 将原始干涉相位图 $I(x, y)$ 按照

$$E(x, y) = \exp(I(x, y)) = \cos(I(x, y)) + j \sin(I(x, y)) \quad (1)$$

变换到矢量空间,记为 $E(x, y)$;

步骤 2 在 $E(x, y)$ 中选取一定大小的滤波窗口 $E^{(w)}(x, y)$ 进行二维快速傅里叶变换(FFT),获得频谱数据 $F^{(w)}(u, v)$, u 和 v 表示空间频率;

步骤 3 将频谱幅值 $|F^{(w)}(x, y)|$ 与选取的核函数 K 作平滑处理,得到 $|F_K^{(w)}(u, v)|$,并对 $|F_K^{(w)}(u, v)|$ 按照

$$|F_K^{(w)}(u, v)| = |F_K^{(w)}(u, v)| / \max(|F_K^{(w)}(u, v)|) \quad (2)$$

进行归一化;

步骤 4 以 $F^{(w)}(u, v) = F^{(w)}(u, v) \cdot |F_K^{(w)}(u, v)|^\alpha$ (3)

所示的加权函数对原始频谱数据 $F^{(w)}(u, v)$ 进行处理,然后,对处理后的频谱作二维傅里叶反变换,即可得到滤波后的结果 $E_C^{(w)}(x, y)$ 。式(3)中的 \cdot 表示点乘, α ($0 \leq \alpha \leq 1$) 为频域滤波器加权函数的幂指数;

步骤 5 将滤波窗口在 $E(x, y)$ 上顺序移动,进行上述滤波处理,直至 $E(x, y)$ 处理完毕,记滤波结果为 $E_C(x, y)$,然后再对 $E_C(x, y)$ 取相位主值,得到 $I_C(x, y)$,即为 Goldstein 法干涉相位图的滤波结果。

实验表明,在 Goldstein 滤波算法中,频域函数的幂指数 α 过大时,滤波结果会使干涉条纹变得模糊,相位分辨率也明显降低。因此,需要对该算法进行改进,以提高处理性能。

2 改进的 Goldstein 干涉相位图滤波算法

2.1 干涉相位图的统计特性

Tough 和 Franceschetti 给出了干涉相位的概率分布函数^[9]:

$$f_{pd}(\phi; \gamma; L; \phi_0) = \frac{(1-\gamma^2)^L}{2\pi} \left\{ \frac{\Gamma(2L-1)}{[\Gamma(L)]^2 2^{2(L-1)}} \left[\frac{(2L-1)\beta}{(1-\beta^2)^{L+0.5}} \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin \beta \right) + \frac{1}{(1-\beta^2)^L} \right] + \right. \\ \left. \frac{1}{2(L-1)} \sum_{i=1}^{L-2} \frac{\Gamma(L-0.5)}{\Gamma(L-0.5-i)} \frac{\Gamma(L-1-i)}{\Gamma(L-1)} \frac{1+(2i+1)\beta^2}{(1-\beta^2)^{i+2}} \right\}, \quad (4)$$

其中 $\beta = \gamma \cos(\phi - \phi_0)$, ϕ_0 为干涉相位期望值; L 为干涉图视数; γ 为相干系数,计算公式为

$$\gamma = |E[g_m g_s^*]| / \sqrt{E|g_m|^2 E|g_s|^2}^{1/2}. \quad (5)$$

$\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数,有

$$\Gamma(L) = \begin{cases} \int_0^\infty t^{L-1} \exp(-t) dt, & L \in \mathbf{R}, \\ (L-1)!, & L \in \mathbf{N}. \end{cases} \quad (6)$$

对于视数 $L=1$ 时,干涉相位的概率密度函数为^[9-10]

$$f_{pd}(\phi; \gamma; L; \phi_0) = \frac{1-\gamma^2}{2\pi} \frac{1}{1-\gamma^2 \cos^2(\phi-\phi_0)} \left\{ 1 + \frac{\gamma \cos(\phi-\phi_0) \arccos[-\gamma \cos(\phi-\phi_0)]}{[1-\gamma^2 \cos^2(\phi-\phi_0)]^{1/2}} \right\} \times$$

$$\left\{1+\frac{\gamma \cos (\phi-\phi_0) \arccos [-\gamma \cos (\phi-\phi_0)]}{\left[1-\gamma^2 \cos ^2(\phi-\phi_0)\right]^{1 / 2}}\right\} . \quad (7)$$

由式(4)~(7)可以看出,干涉相位的概率密度函数依赖于相干系数 γ 和视数 L . 当视数 L 一定时,随着相干系数 γ 的增大,干涉相位分布的标准差越来越小;在相干系数不变的情况下,随着视数的增加,相位不断向期望值集中;当相干系数趋近于 0 时,即完全不相干时,干涉相位呈均匀分布;当相干系数趋近于 1 时,干涉相位的概率密度函数趋近于脉冲函数 δ .

由干涉相位的概率密度函数 $f_{\text{pd}}(\phi; \gamma; L; \phi_0)$ 可以得到其标准差 σ_ϕ^2 为

$$\sigma_\phi^2=\int_{-\pi}^{\pi}(\phi-\phi_0)^2 f_{\text{pd}}(\phi; \gamma; L; \phi_0) \mathrm{d} \phi . \quad (8)$$

Bamler 和 Hartl 推导了视数 $L=1$ 时干涉相位图标准差与相干系数 γ 之间的函数关系^[1],即

$$\sigma_\phi^2=\left(\pi^2 / 3\right)-\pi \arcsin \gamma+\arcsin ^2 \gamma-\left(\operatorname{Li}_2\left(\gamma^2\right) / 2\right) , \quad (9)$$

其中 $\operatorname{Li}_2\left(\gamma^2\right)$ 为欧拉级数,定义为

$$\operatorname{Li}_2\left(\gamma^2\right)=\sum_{k=1}^{\infty}\left(\gamma^{2 k} / k^2\right) . \quad (10)$$

Rodriguez 和 Martin 利用克拉美-罗(Cramer-Rao)限,给出了 σ_ϕ^{CR} 与 L 和 γ 的关系式^[11]:

$$\sigma_\phi^{\text{CR}}=\left(1 /\left(2 L\right)^{1 / 2}\right)\left(\left(1-\gamma^2\right)^{1 / 2} / \gamma\right) . \quad (11)$$

图 1 给出了由概率密度函数和 Cramer-Rao 限公式计算得到的 σ_ϕ^2 与 L 和 γ 的关系曲线,可见随着 L, γ 的增加, σ_ϕ^2 逐渐减小. 因此, γ 可以用于量度干涉相位图噪声的大小. 当 L 一定时, γ 越大,则干涉相位噪声较小,相位区域变化比较均匀,因此,可以用 γ 对 Goldstein 滤波法进行改进.

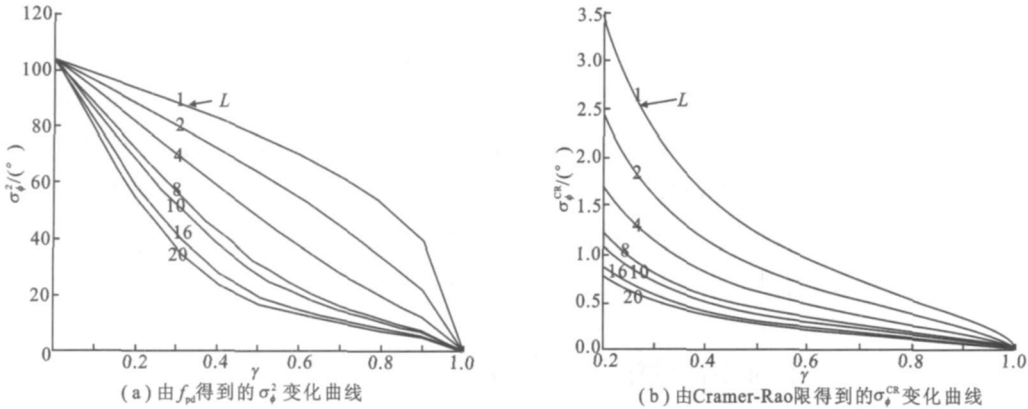


图 1 干涉相位 σ_ϕ^2 随视数 L 及相干系数 γ 的变化曲线

2.2 基于相干系数 γ 的改进 Goldstein 干涉相位图滤波算法

Goldstein 干涉相位图滤波算法中的频域加权函数采用固定幂指数的形式^[7],但如何选定幂指数 α 值,对滤波效果影响较大. 由于干涉相位图不同的区域均采用相同的 α ,而忽略了相应区域噪声实际大小的差异,其结果往往是对噪声干扰大的区域欠滤波,对噪声干扰较小的区域过滤波,从而降低了整体处理效果. 因此,笔者利用干涉影像对的相干系数 γ 构造频域加权函数,对标准 Goldstein 滤波算法进行改进

$$\begin{cases} \alpha_k^{(w)}(u, v)=\sin ^{1 /(1-\gamma)}\left(\left|F_k^{(w)}(u, v)\right| / \max \left(\left|F_k^{(w)}(u, v)\right|\right)\right) , \\ F_k^{(w)}(u, v)=\left|F_k^{(w)}(u, v)\right|^{\alpha_k^{(w)}(u, v)} F_k^{(w)}(u, v) . \end{cases} \quad (12)$$

分析式(12),改进后的 Goldstein 滤波算法采用干涉影像对局部相干系数 γ 的正弦函数计算加权函数的幂指数 α ,从而使得滤波算法具有了很好的自适应性. 当 γ 趋近于 1 时, α 趋近于 0,加权函数值趋近于 1,此时,对频域系数不进行修正. 而 γ 趋近于 1,反映了干涉相位图所对应的干涉影像对具有较好的相干性,所得到的干涉相位图中噪声水平较低,从而不需进行过多的滤波处理. 当 γ 趋近于 0 时,干涉影像对的相干性较差,所得到的干涉相位图中噪声干扰十分严重,需要进行充分的滤波处理.

图 2 给出了加权函数的幂指数 α 与干涉影像对的相干系数、归一化相位图频域系数(Normalized

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

Frequency Coefficients, 缩写 NFC) 的关系曲线. 可以看出, 对于给定的 NFC, γ 越大, 则 α 值越小; 对于给定的 γ , NFC 越小, α 值越小. 实验结果表明, 这一性质对于保持干涉相位图中的边缘细节信息非常有意义.

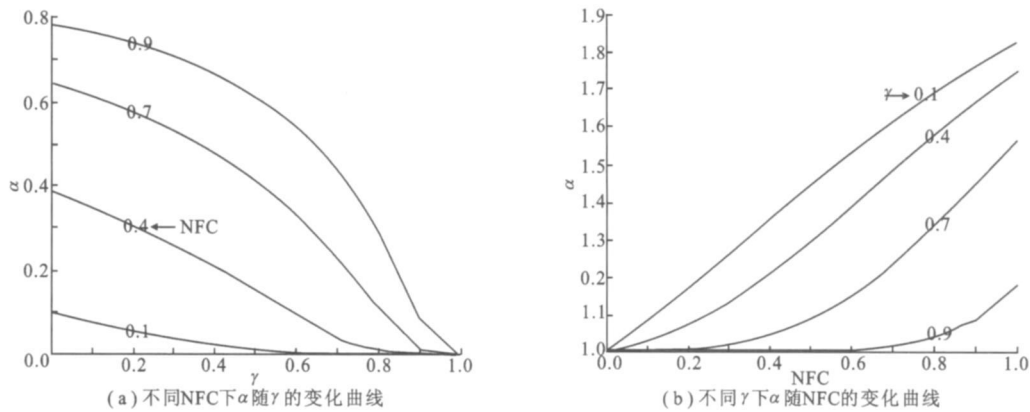


图 2 α 随 γ 及 NFC 变化的曲线

- 综合以上分析, 改进的 Goldstein 滤波算法处理步骤如下:
- 步骤 1 由原始干涉相位图 $I(x, y)$ 得到矢量图 $E(x, y)$, 计算相干系数矩阵 $M_I(x, y)$;
 - 步骤 2 将 $E(x, y)$ 和 $M_I(x, y)$ 划分为一系列相互重叠的矩形区域 $E^{(w)}(x, y)$ 和 $M_I^{(w)}(x, y)$. 为了提高计算频域数据的 FFT 运算效率, 矩形区域 w 的边长通常取为 2 的指数幂, 而矩形区域间的重叠部分的大小一般取为矩形区域边长大小的一半减 1, 这种分块方法是为了避免分块所带来的边界效应对处理结果的影响;
 - 步骤 3 对于每个 $E^{(w)}(x, y)$, 利用二维 FFT 计算相应的频域系数 $F^{(w)}(u, v)$, 并对 $|F^{(w)}(u, v)|$ 进行平滑处理, 得到 $|F_K^{(w)}(u, v)|$; 对于每个 $M_I^{(w)}(x, y)$, 计算相应均值 $\bar{\gamma}$;
 - 步骤 4 以 $\bar{\gamma}$ 代替 γ , 按照式 (12) 计算加权因子 $\alpha_K^{(w)}(u, v)$ 和加权函数值, 对频域系数进行处理;
 - 步骤 5 对处理后的频域数据进行二维逆 FFT 运算, 并计算对应的相位主值, 得到滤波后的干涉相位;
 - 步骤 6 对每个分块矩形重复上述处理过程, 直至整幅干涉相位图处理完毕.

3 实验结果与分析

利用仿真数据和实际 ERS 数据对改进的 Goldstein 滤波算法进行测试和分析, 并通过与传统的空域均值滤波、频域均值滤波和标准 Goldstein 滤波算法的处理结果的比较, 对其有效性进行检验.

3.1 改进算法对仿真数据的处理性能分析

影响两幅 SAR 图像相干性的因素有许多^[4-5], 实验中对几何基线去相干、热噪声去相干和时间去相干的影响效果进行仿真, 结果图像如图 3 所示. 其中, 图 3(a) 为不含噪声的干涉相位图, 图 3(b) 为仿真得到的相干系数, 图 3(c) 为含有噪声的干涉相位图.

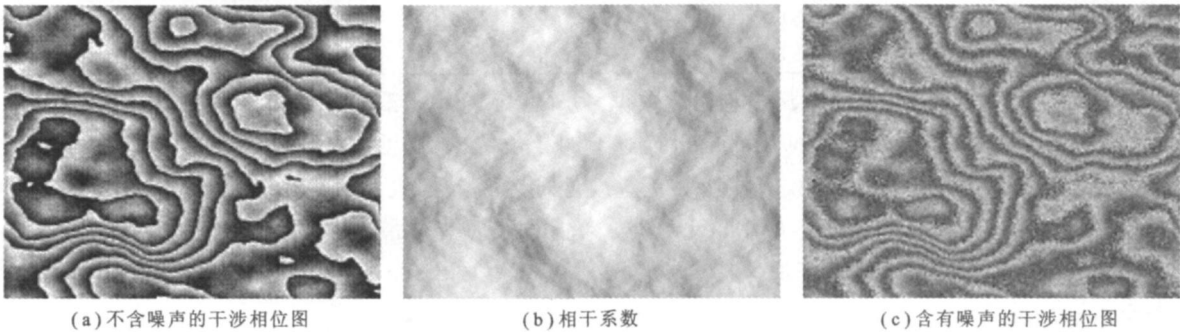


图 3 仿真得到的相位干涉图和相干系数

表 1 滤波器参数

滤波器类型	分块大小	重叠尺度	平滑核函数	滤波器参数
Goldstein	32×32	15	3×3 高斯核	$\alpha = 0.9$
改进 Goldstein	32×32	15	3×3 高斯核	$\alpha_k^{(w)}(u,v) = \sin^{1/(1-\gamma)}(F_k^{(w)}(u,v) /\max(F_k^{(w)}(u,v)))$

对图 3(c)所示干涉相位图按照表 1 所示的滤波器参数分别进行滤波处理后,得到的结果如图 4 所示.其中,图 4(c)由上至下分别对应不含噪声仿真干涉图、含有噪声干扰仿真干涉图、Goldstein 滤波算法处理后干涉相位图、改进的 Goldstein 滤波算法处理后干涉相位图第 180 行前 150 列的横向剖视图.可以看出,改进的 Goldstein 滤波算法比 Goldstein 滤波算法的处理效果有了很大的提高,并且处理后的剖视图与原始未加噪声干扰的横向剖视图基本一致,从而说明改进后的 Goldstein 滤波算法具有有效的噪声去除效果,可以较好地保持干涉相位的分辨率.

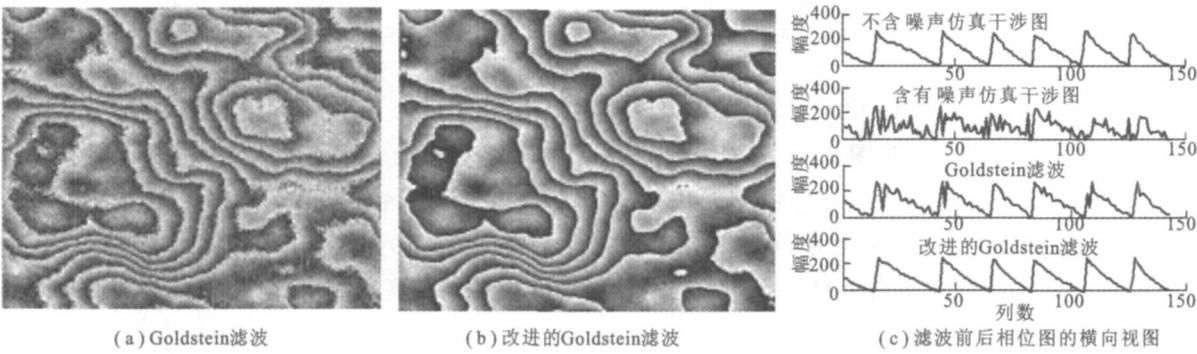


图 4 滤波算法的处理结果对比

3.2 改进算法对 ERS 干涉相位数据的处理性能分析

为了进一步验证改进的 Goldstein 算法的有效性,下面以 ERS 干涉相位数据对算法进行进一步的测试,并将算法与 Goldstein 算法、空域均值算法和频域均值算法的处理结果进行比较.

表 2 给出了所采用的 ERS 数据的基本参数信息,选用的图像大小为 400×400.图 5 和图 6 分别给出了上述算法对西藏玛尼地区 and 新疆喀喇昆仑山地区局部干涉图像的滤波处理结果.表 3 是上述滤波算法处理前后的残差点数目对比,残差点数通常用作定量评定 InSAR 干涉图滤波效果的指标.

表 2 ERS-2 数据信息

地区	卫星/数据类型	轨道号	帧号	数据获取时间
喀喇昆仑山地区	ERS-2/SLC	05198	2889	1996-04-18
	ERS-2/SLC	24871	2889	1996-04-17
玛尼地区	ERS-2/SLC	05169	2889	1996-04-16
	ERS-2/SLC	24842	2889	1996-04-15

表 3 各类算法局部干涉相位滤波残差点数目对比

地区	未滤波	Goldstein	改进的 Goldstein	空域均值	频域均值
西藏玛尼地区	5 602	276	121	427	73
新疆喀喇昆仑山地区	3 208	141	95	265	55

可以看出,对于实际获取的 ERS 干涉相位数据,Goldstein 算法、改进的 Goldstein 算法、空域均值算法和频域均值算法都能够不同程度地抑制噪声干扰对干涉相位的影响,滤波处理后干涉相位图中残差点的数目都明显减少.相比较而言,频域加权算法虽然在滤波处理后残差点数目减少最多,但是滤波处理后的相位分辨率也显著降低.笔者给出的改进 Goldstein 滤波算法的处理效果最好,可以有效消除噪声影响,滤波后残差点的数目也大大减少,同时较好地保持了相位分辨率,而 Goldstein 算法和空域均值处理算法的处理效果则介于上述两种算法之间.

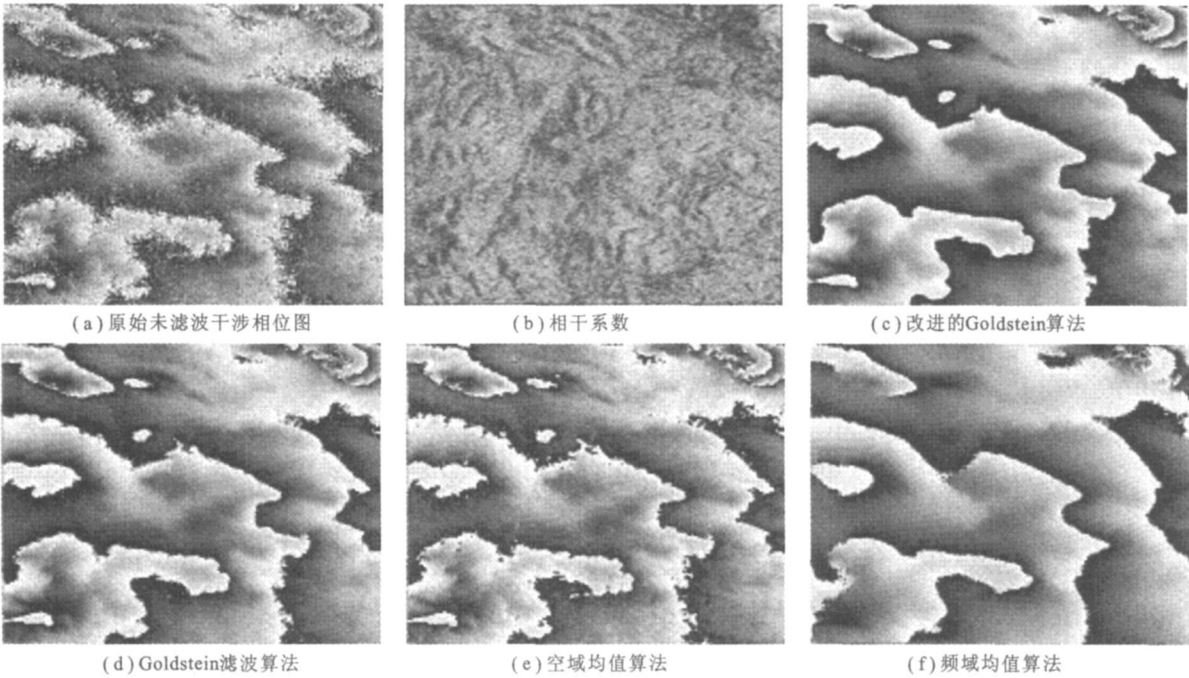


图 5 西藏玛尼地区局部干涉相位图滤波处理结果

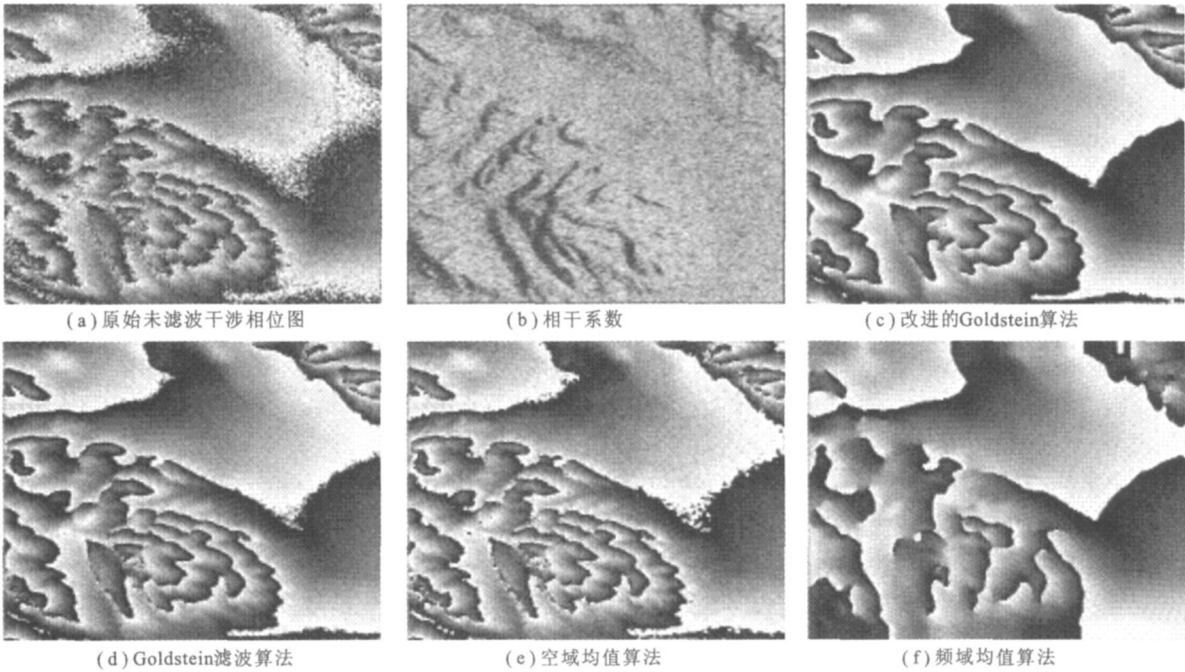


图 6 新疆喀喇昆仑山地区局部干涉相位图滤波处理结果

4 总 结

针对 InSAR 数据处理中的干涉相位图的噪声滤波问题,笔者给出了一种改进的 Goldstein 滤波算法.通过深入分析干涉相位图与干涉影像对相干系数之间的关系,构造了一种基于局部相干系数的频域加权函数幂指数计算方法,使得频域加权滤波算法具有了良好的自适应性,从而有效避免了相干性强的相位区域的过滤波和相干性差的区域的欠滤波问题.通过对仿真数据和实际 ERS 干涉相位数据的处理表明,改进的

(下转第 259 页)

- [7] Li P. An Adaptive Binning Color Model for Mean Shift Tracking[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology, 2008, 18(9): 1293-1299.
- [8] Do M N, Vetterli M. The Contourlet Transform: an Efficient Directional Multiresolution Image Representation[J]. IEEE Trans on Processing, 2005, 14(12): 2091-2106.
- [9] Haralick R M, Shanmugam K, Dinstein I. Textural Features for Image Classification[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1973, 3(6): 610-621.
- [10] Wen Zhiqiang, Cai Zixing. Convergence Analysis of Mean Shift Algorithm[J]. Journal of Software, 2007, 18(2): 205-212.

(编辑: 郭 华)

(上接第 253 页)

Goldstein 滤波算法具有优良的适用性,能够在最大限度地降低噪声干扰的同时,较好地保持相位分辨率.

参考文献:

- [1] Bamler R, Hartl P. Synthetic Aperture Radar Interferometry, Inverse Problem[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 14(4): 1-54.
- [2] 刘宝泉. 干涉合成孔径雷达测量关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
Liu Baoquan. Study on Key Techniques for Interferometric Synthetic Aperture Radar Measurement[D]. Xi'an: Xidian University, 2008.
- [3] Lee J S, Papathanassiou K P. A New Technique for Noise Filtering of SAR Interferometric Phase Images[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1456-1465.
- [4] 薛跃明, 郭华东, 王长林. InSAR 处理中滤波方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(3): 356-359.
Xue Yueming, Guo Huadong, Wang Changlin. Research on Filtering Methods of InSAR Processing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008, 23(3): 356-359.
- [5] 蔡国林, 刘祥国, 李永树. 一种基于小波相位分析的 InSAR 干涉图滤波算法[J]. 测绘学报, 2008, 37(3): 296-300.
Cai Guolin, Liu Guoxiang, Li Yongshu. An Algorithm of Filtering InSAR Interferogram Based on Wavelet Phase Analysis[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(3): 296-300.
- [6] 盛国芳, 冷朝霞, 焦李成. 数据融合在 SAR 图像去噪中的应用[J]. 西安电子科技大学学报, 2004, 31(1): 91-95.
Sheng Guofang, Leng Zhaoxia, Jiao Llicheng. Application of Data Fusion in SAR Image Denoising[J]. Journal of Xidian University, 2004, 31(1): 91-95.
- [7] Goldstein R M, Werner C L. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25 (21): 4035-4038.
- [8] Baran I, Stewart, M P, Kampes B M, et al. A Modification to the Goldstein Radar Interferogram Filter[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(9): 2114-2118.
- [9] Tough R J, Blacknell D, Quegans S. A Statistical Description of Polarimetric and Interferometric Synthetic Aperture Radar Data[C]//Mathematical and Physical Sciences. London: the Royal Society, 1995: 567-589.
- [10] Just D, Bamler R. Phase Statistics of Interferograms with Application to Synthetic Aperture Radar[J]. Applied Optics, 1994, 33(20): 4361-4368.
- [11] Rodriguez E, Martin J M. Theory and Design of Interferometric Synthetic Aperture Radars[J]. Proc IEE, 1992, 139 (2): 147-159.

(编辑: 郭 华)