

一种改进的 Goldstein InSAR 干涉图滤波算法

于晓歆^{1, 2} 杨红磊¹ 彭军还¹

(1 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京市学院路 29 号, 100083)

(2 重庆市勘测院, 重庆市电测村 231 号, 400020)

摘要:提出了一种抑制 InSAR 干涉图噪声并保持干涉图条纹细节的算法, 该算法改进了 Goldstein 滤波的参数 α , 将干涉图的相位标准偏差函数模型作为参数。相位标准偏差是相位噪声的体现, 以干涉图的相位噪声强弱来决定滤波的强弱, 噪声强的局部区域强滤波, 噪声弱的局部区域弱滤波。实验结果表明, 此方法改善了滤波效果, 增强了滤波的局部自适应性和条纹细节的保真性。

关键词:InSAR; 干涉图; Goldstein 滤波; 相位噪声; 局部自适应

中图分类号:P237.3

InSAR 干涉图经常存在噪声。因此, 生成干涉图后, 为降低噪声、减少残余, 需要对干涉图进行滤波^[1]。目前, 国内外有很多滤波算法^[2-6], 这些方法均能对 InSAR 干涉相位图起到降噪作用。其中, Goldstein 滤波是比较经典的一种频域滤波方法^[4]。但是, Goldstein 滤波方法强烈依赖滤波参数 α , 滤波时参数取值是固定的, 带有很大的主观性。

本文提出的改进的 Goldstein 滤波方法, 用相位标准偏差函数作为 Goldstein 滤波的参数。实验结果表明, 该方法在有效抑制噪声的同时, 保持了条纹信号的细节信息, 增强了滤波的自适应性。

1 改进的 Goldstein 滤波

Goldstein 滤波利用傅立叶变换把干涉图从空间域转换到频率域, 进行功率谱平滑。噪声在频谱空间属于宽带信号, 信号属于窄带信号, 通过对频率域实施平滑实现了在信号区域去噪, 而噪声区域不改变噪声特性的自适应。Goldstein 滤波方法的步骤为^[2]: 首先, 把干涉图 $I(x, y)$ 分成相互重叠的小块(重叠率不小于 75%), 并对其进行二维傅立叶变换, 干涉小块记为 $I(u, v)$, 得到局部功率谱 $S(u, v)$ 。然后, 把 $S(u, v)$ 与矩形平滑窗口 $W(u, v)$ 卷积, 用以减小估计方差, 之后进

行非线性变化, 得到自适应滤波器 $Z(u, v)$ 。最后, 把经傅立叶变化的干涉图小块 $I(u, v)$ 与频率域滤波器 $Z(u, v)$ 相乘, 进行傅立叶逆变换, 就得到了滤波后的干涉图。其中, 滤波参数 α 取为 0 时, 相当于没有滤波, 取为 1 时强滤波, 根据经验, 滤波参数一般取为 0.5。

干涉图相位的质量可以直接由干涉图的相干值来评价, 两幅复数 SAR 影像 g_m 和 g_s (干涉像对)的相干值可以定义为^[7]:

$$\gamma = \frac{E\{g_m g_s^*\}}{\sqrt{E\{|g_m|^2\}E\{|g_s|^2\}}} \quad (1)$$

干涉图的相位标准偏差可以由干涉图相位的概率密度函数通过数值积分得到^[8], 是相干性和视数的函数。不同视数下, 干涉图相位标准偏差与相干值成反比关系, 即干涉图的相干值高的区域噪声较小, 相干值低的区域噪声较大。本文滤波算法选择视数为 1 时的相位标准偏差进行实验数据验证。

文献^[9]把相位标准偏差 ($L=1$) 定义为相干值的绝对值 $|\gamma|$ 的函数:

$$\sigma_\phi = E[(\phi - \phi_0)^2] = \frac{\pi^2}{3} - \pi \arcsin |\gamma| + \arcsin^2 |\gamma| - \frac{Li_2(|\gamma|^2)}{2} \quad (2)$$

式中, $Li_2(\cdot)$ 是 Euler 的算法, 可以表示为:

$$Li(|\gamma|)=\sum_{k=1}^{\gamma}\frac{|\gamma|^{2k}}{k^2}\tag{3}$$

本文用相位标准偏差值的函数模型作为滤波参数在频率域内进行局部自适应滤波。本文构建的滤波参数在噪声强的区域进行强滤波,在噪声弱的区域弱滤波。首先,用最大最小值法对相位标准偏差值进行归一化处理,使之取值在[0,1]区间:

$$\sigma'=\frac{\bar{\sigma}_{\varphi}-\sigma_{\varphi,\min}}{\sigma_{\varphi,\max}-\sigma_{\varphi,\min}}\tag{4}$$

式中, $\bar{\sigma}_{\varphi}$ 取局域窗口的均值,本文选为 3×3 窗口; $\sigma_{\varphi,\min}$ 、 $\sigma_{\varphi,\max}$ 分别为干涉图相位标准差的最大值和最小值。通过分析多个实验区域数据中的滤波参数直方图,发现由式(8)求得的参数值 σ' 在[0,1]区间都有所分布,且分布随机,并不集中。为了使参数 σ' 小于 0.4 的区域滤波强度加深,选用参数 σ' 的指数函数并进行归一化处理,使之范围仍在[0,1]区间:

$$\alpha=\frac{\exp_{\sigma'}}{\exp_{\max}}\tag{5}$$

确定干涉图每个像元的滤波参数后,按照 Goldstein 滤波方法的步骤进行本文方法的滤波。

2 实验与分析

本文选取的评价指标参数有残差点数^[10]、相位标准差(PSD)^[11]、相位差均值及相位差和值(SPD)^[12]等几种干涉图滤波的评价指标。

2.1 模拟数据实验结果与评价

在像元数为 800×800 的模拟无噪声的干涉相位图中加入根据坡度变化的噪声,对加噪声的干涉图分别用 Goldstein 滤波方法、Baran 滤波方法^[5]、LZW 滤波^[6]、基于信噪比的滤波方法^[13]及本文提出的改进方法进行滤波,几种干涉相位图如图 1 所示。

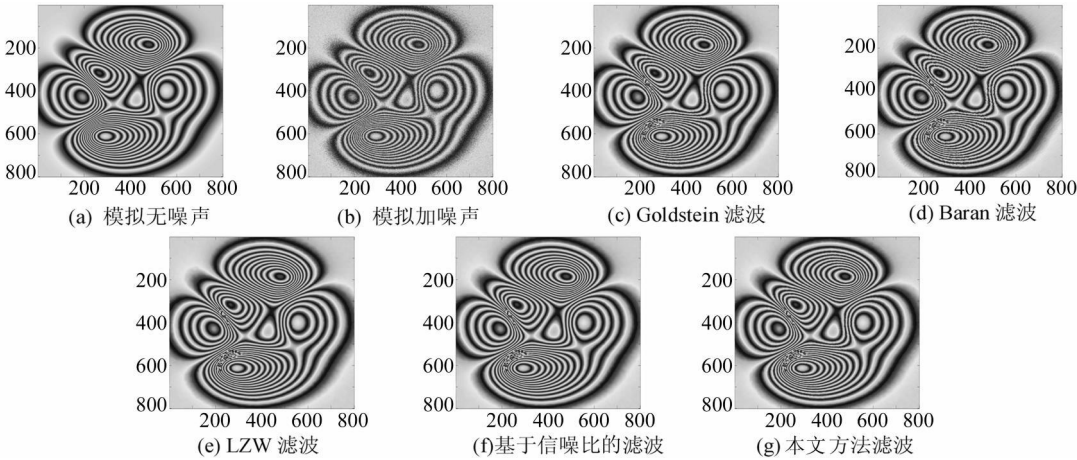


图 1 模拟数据干涉图滤波结果比较

Fig.1 Simulated Data and Comparison of Filtered Results

由滤波后的干涉条纹图来看,5 种方法滤波后条纹趋势明朗,达到了平滑效果。但是放大干涉图可以看到,Goldstein 滤波及 Baran 滤波的滤波结果比较其他 3 种滤波还是存在很多噪声,细小的条纹不够光滑;本文方法与 LZW 滤波、基于信噪比的滤波方法结果相近,都比较好。本文选取了第 230 列的干涉图剖面图(见图 2),这一列有宽条纹也有细小条纹,与模拟的真实相位剖面图进行比较可以看出,本文方法比 Goldstein 滤波及 Baran 滤波方法更好地保持了条纹的细节信息。从表 1 滤波效果的评价指标看,本文方法比 Goldstein 滤波及 Baran 滤波方法残差点明显减少,与 LZW 滤波、基于信噪比的滤波残差点减少率相当。因选取的实验区域小,残差点减少率不是很明显,可以预见的是,对一幅干涉图来说,残

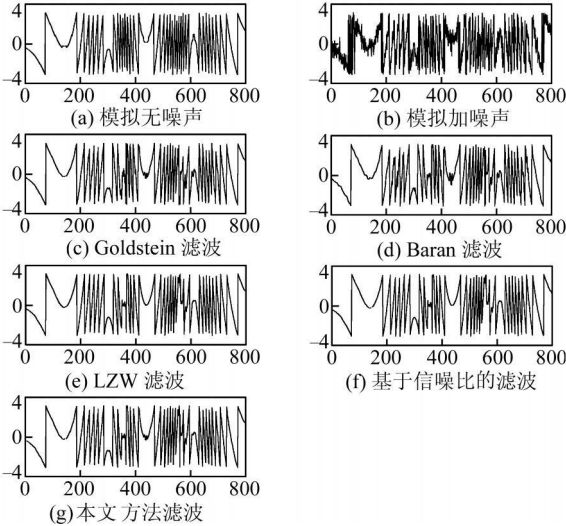


图 2 模拟数据的干涉图剖面图(第 230 列)

Fig.2 Cross Section over Simulated Data and Filtered Interferogram (Row 230)

差点减少量会更多。从所有的评价指标来看,本文方法优于 Goldstein 滤波与 Baran 滤波方法,与 LZW 滤波和基于信噪比的滤波相近。

2.2 真实数据实验结果与评价

选择伊朗 Bam 地区 2003-06-11 与 2003-12-03 的 Envisat-ASAR 数据进行实验。图 3(a)即为视数为 1 的去除平地效应后的干涉相位图,其大小为 500×1 000。原始干涉相位图及几种方法滤波后的干涉相位图见图 3。

实验时,本文选取了几块干涉图区域的真实数据,在条纹趋势明显、干涉图质量较好的区域,用 Goldstein 滤波残差点减少率就能达到 98%左

右,可以达到满意效果。在干涉效果越差、条纹越密集的区域,本文方法的优势越明显。因此,本文选择了噪声稍多且有明显条纹的区域进行实验。5 种方法滤波后的干涉图质量用表 2 的评价指标进行评价,各项评价指标中,本文方法都要优于 Goldstein 滤波及 Baran 滤波方法,与 LZW 滤波方法和基于信噪比的滤波方法效果相近。多个区域的真实数据验证发现,干涉图尺寸越大,噪声越多,残差点数目减少得越多,滤波效果越好。从所编制的程序用 Matlab 软件运行所需的时间来看,Goldstein 滤波速度最快,本文方法与之相差不多,具有实用性。

表 1 模拟数据的滤波结果评价
Tab.1 Filter Evaluation of Simulated Dataset

		评价指标				
		正残差点数	负残差点数	残差点减少率	SPD _{whole}	PSD 均值
滤波方法	模拟无噪声相位图	0	0	—	2.030 9×10 ⁵	0.588 9
	模拟加噪声相位图	339	339	—	6.553 4×10 ⁵	1.087 8
	Goldstein 滤波	116	116	65.78%	2.034 7×10 ⁵	0.587 6
	Baran 滤波	151	151	55.46%	2.163 8×10 ⁵	0.601 7
	LZW 滤波	87	87	74.34%	1.980 0×10 ⁵	0.582 8
	基于信噪比的滤波	87	87	74.34%	1.987 9×10 ⁵	0.583 4
	本文方法滤波	88	88	74.04%	2.006 5×10 ⁵	0.585 9
	滤波效果评价	越少越好	越少越好	越大越好	越少越好	越小越好

表 2 真实数据的滤波结果评价
Tab.2 Filter Evaluation of Real Dataset

		评价指标				
		正残差点数	负残差点数	残差点减少率	SPD _{whole}	PSD 均值
滤波方法	原始干涉相位图	38 741	38 747	—	8.503 5×10 ⁵	1.697 6
	Goldstein 滤波	3 268	3 267	91.57%	3.204 9×10 ⁵	1.019 1
	Baran 滤波	3 158	3 158	91.85%	3.234 0×10 ⁵	1.024 9
	LZW 滤波	2 451	2 452	93.67%	2.873 2×10 ⁵	0.981 8
	基于信噪比的滤波	2 444	2 445	93.69%	2.871 1×10 ⁵	0.981 0
	本文方法滤波	2 450	2 451	93.68%	2.872 5×10 ⁵	0.981 6
	滤波效果评价	越少越好	越少越好	越大越好	越少越好	越小越好

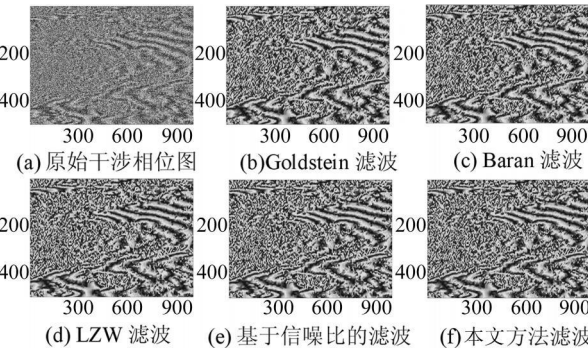


图 3 真实数据滤波结果比较

Fig.3 True Data and Comparison of Filtered Results

本文选取干涉图第 450 行剖面进行条纹细节的保真性分析(见图 4),在条纹密集的区域,本文方法优于Goldstein 滤波与 Baran滤波,与LZW 滤

波和基于信噪比的滤波相近。本文方法在一定程

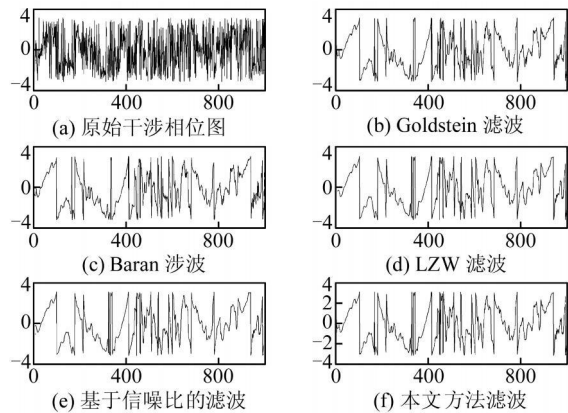


图 4 真实数据的干涉图剖面图(第 450 行)

Fig.4 Cross Section over True Data and Filtered Interferogram(Line 450)

度上保持了条纹的细节信息。

3 结 语

本文方法不但有较强的抑制噪声的能力, 具有很好的相位保持能力和细节保持能力, 将提高相位解缠及整个 InSAR 处理结果的精度。在后续研究中, 可选取不同视数对本文方法进行验证, 此外, 可探测滤波后干涉图中的粗差点并用值代替, 将会进一步改善滤波效果。

参 考 文 献

[1] 李平湘, 杨杰. 雷达干涉测量原理与应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2006

[2] 黄柏圣, 许家栋. 一种局部自适应的干涉相位图滤波方法[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2009, 34(7): 818-821

[3] Goldstein R M, Werner C L. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications [J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25 (21): 4 035-4 038

[4] 靳国旺, 韩晓丁, 贾博, 等. InSAR 干涉图的矢量分离式小波滤波[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2008, 33(2): 132-135

[5] Baran L, Stewart M P, Kampes B M, et al. A Modification to the Goldstein Radar Interferogram Filter[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(9): 2 114-2 118

[6] Li Z W, Ding X L, Huang C, et al. Improved Filtering Parameter Determination for the Goldstein Radar Interferogram Filter [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2008, 63: 621-634

[7] Bamler R, Just D. Phase Statistics and Decorrelation in SAR Interferometry [C]. IGARSS, Tokyo, Japan, 1993

[8] Franceschetti G, Lanari R. Synthetic Aperture Radar Processing[M]. Florida: CRC Press, 1999

[9] Bamler R, Hartl P. Synthetic Aperture Radar Interferometry[J]. Inverse Problem, 1998, 14: 1-54

[10] Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite Radar Interferometry Two-Dimensional Phase Unwrapping[J]. Radio Science, 1988, 23(4): 713-720

[11] Goldstein R M, Werner C L. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Application[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(21): 4 035-4 038

[12] Li Zhilin, Zou Weibao, Ding Xiaoli, et al. A Quantitative Measure for the Quality of InSAR Interferograms Based on Phase Differences[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2004, 70(10): 1 131-1 137

[13] 孙倩, 朱建军, 李志伟, 等. 基于信噪比的 InSAR 干涉图自适应滤波[J]. 测绘学报, 2009, 38(5): 438-442

第一作者简介: 于晓歆, 硕士生, 研究方向为 InSAR 数据处理与分析。
E-mail: yuxiaoxin2010@126.com

A Modified Goldstein Algorithm for InSAR Interferogram Filtering

YU Xiaoxin^{1, 2} YANG Honglei¹ PENG Junhuan¹

(¹ School of Land Sciences and Technology, China University of Geosciences, 29 Xueyuan Road, Beijing 100083, China)
(² Chongqing Surveying Institute, 231 Diancecun, Chongqing 400020, China)

Abstract: An algorithm for filtering InSAR phase noise and preserving details of interferometric fringes is proposed, which improves Goldstein filtering parameter α and considers function of standard deviation of phase to be parameter. The standard deviation of phase shows phase noise effectively. According to degree of interferogram phase noise, the method can determine degree of filter strength. The modification can make the local area with strong noise strongly filtered, while those with week noise weekly filtered. Experimental results with both the simulated data sets and the real one show that the new method can improve filtering effect and enhance the local adaptability of the filter and fidelity details of interferometric fringes.

Key words: InSAR; interferogram; Goldstein filter; phase noise; local adaptability