

doi: 10.6046/gtzyyg.2019.01.16

引用格式: 王念秦, 乔德京, 符喜优. 滤波参数对 Goldstein 干涉相位图滤波性能的影响分析[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(1): 117–124. (Wang N Q, Qiao D J, Fu X Y. An analysis of the influence of filtering parameter on the performance of Goldstein InSAR interferogram filter[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(1): 117–124.)

滤波参数对 Goldstein 干涉相位图滤波性能的影响分析

王念秦¹, 乔德京¹, 符喜优^{2,3}

(1. 西安科技大学地质与环境学院, 西安 710054; 2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 经典的 Goldstein InSAR 干涉图滤波算法选取滤波参数时存在较大的主观性。以经验值作为滤波参数的 Goldstein 滤波算法为基础, 基于相干系数、相位标准偏差、伪相干系数、伪信噪比和结构相似性来获得滤波参数的 Goldstein 自适应滤波方法。采用 32 像素 × 32 像素的滤波窗口对模拟和真实干涉相位图分别进行单次滤波实验, 对滤波结果进行详细评价和对比分析。研究表明, 基于这 6 种滤波参数均能在一定程度上抑制噪声, 使干涉条纹趋势更加清晰, 提升了干涉图的质量。其中, 基于相位标准偏差的滤波不仅能够抑制噪声, 并且较好地保持干涉图的细节和边缘信息; 基于结构相似性和伪信噪比的滤波效果相对较弱; 基于经验值、相干系数和伪相干系数的滤波效果相对欠佳。

关键词: 合成孔径雷达测量; 干涉相位图滤波; 噪声; Goldstein 滤波; 滤波参数

中图分类号: TP 79 文献标志码: A 文章编号: 1001-070X(2019)01-0117-08

0 引言

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture Radar, InSAR)技术具有全天候、高精度、大区域等突出优势, 已在地形测量、地表形变监测和冰川运动监测等领域被广泛应用^[1-3]。但受地面散射特性变化、时间失相关、几何失相关和热噪声等因素的影响, 干涉图中存在大量相位噪声, 使相位解缠和干涉处理难度增加, 同时影响干涉测量精度^[4]。因此, 对干涉图进行有效滤波处理, 去除干涉图中的噪声, 是 InSAR 数据处理的重要步骤。

Goldstein 滤波作为一种经典的频率滤波方法, 具有滤波速度快、计算复杂度低等特点, 被广泛应用于国内外 InSAR 处理软件中。但 Goldstein 滤波效果依赖于固定的滤波参数 α , 使滤波结果存在较大的主观性^[5]。为了克服 Goldstein 滤波参数选取的主观性, 国内外学者在该经典算法基础上进行了改进, 衍生了很多变种算法, 如基于相干性的 Baran 滤波^[6]、Zhao 滤波^[7]等和时空域滤波的边缘保持 - Goldstein 组合滤波^[8]、Wang 滤波^[9]等。这些算法

旨在增强自适应性, 保持干涉条纹细节, 但这些改进方法仍然会涉及 Goldstein 滤波参数选择问题, 目前尚未有文献系统地阐述和对比各种参数对 Goldstein 滤波效果的影响。为此, 笔者在 Goldstein 滤波算法的基础上, 选择常用及最新的自适应滤波参数进行 Goldstein 滤波, 并系统分析滤波参数对 Goldstein 干涉相位图滤波效果的影响, 以期合理选择 Goldstein 滤波参数提供一些思路和参考依据。

1 Goldstein 滤波参数计算方法

Goldstein 滤波算法^[10]是 Goldstein 和 Werner 在 1998 年提出的一种干涉图自适应滤波的方法, 是利用傅里叶变换将干涉图从空间域转换到频率域, 把干涉图分割成重叠的滑动窗口, 然后对窗口的功率谱进行平滑处理。处理后的图像 $H(u, v)$ 为

$$H(u, v) = S\{|Z(u, v)|\}^\alpha Z(u, v), \quad (1)$$

式中: α 为滤波参数(根据经验选取, 一般取 0.5), $\alpha \in (0, 1)$; $S\{\}$ 为平滑算子; $Z(u, v)$ 为待滤波图像; u 和 v 分别为空间频率。

鉴于干涉图噪声分布的非均匀性, 通常情况下

收稿日期: 2017-10-19; 修订日期: 2017-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目“黄土山区城镇化行为过程与地质环境耦合机制”(编号: 41572287)资助。

第一作者: 王念秦(1964-), 男, 教授, 主要从事岩土体稳定与地质灾害防治等方面的科研和教学工作。Email: younglock@163.com。

通信作者: 乔德京(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事地学分析与地质灾害遥感监测研究。Email: djqiao@stu.xust.edu.cn。

很难确定合适的全局滤波参数 α 。本文通过基于相干系数、相位标准偏差、伪相干系数、伪信噪比和结构相似性的计算,来代替原 Goldstein 滤波中固定的经验滤波参数 α 。

1.1 相干系数

Baran 等^[6]认为干涉图的相干性能够作为反应噪声水平的定量指标,提出了基于相干系数来计算滤波参数,其关系表达式为

$$\alpha = 1 - \bar{\gamma}, \quad (2)$$

式中 $\bar{\gamma}$ 为有效窗口的平均相干值。

1.2 相位标准偏差

干涉图的相位偏差是相干性和视数的函数。不同视数,干涉图相位标准偏差与相干值成反比,即干涉图高相干的区域噪声较小,相干值低的区域噪声较大。于晓歆等^[11]提出了基于干涉图的相位标准偏差计算滤波参数,其关系表达式为

$$\alpha = \frac{\exp \sigma'}{\exp \sigma'_{\max}}, \quad (3)$$

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

式中: $\bar{\sigma}_{\varphi}$ 为局部窗口的均值; $\sigma_{\varphi \min}$ 和 $\sigma_{\varphi \max}$ 分别为干涉图相位标准偏差的最大值和最小值。

1.3 伪相干系数

虽然相干性是干涉图质量的指示器,但是估计的相关系数是有偏的,导致滤波指示总是被低估。为避免高偏差,Zhao 等^[7]提出了基于干涉图的伪相干系数计算滤波参数,其关系表达式为

$$\alpha = 1 - \bar{P}_c, \quad (5)$$

$$\bar{P}_c = \left(\sum_{i=1}^{N_e} P_c \right) / N_e, \quad (6)$$

$$P_c = \left| \sum_{i=1}^N \varphi_i \right| / \sum_{i=1}^N \varphi_i, \quad (7)$$

式中: \bar{P}_c 为滤波窗口内伪相干系数的均值; P_c 为干涉复数相位值; N 为有效滑动滤波窗口内像元总数; N_e 为伪相干估计窗口内像元总数; φ_i 为干涉相位值。

1.4 伪信噪比

经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD) 可以将一幅复杂的遥感图像分解成一组互不

相同的、简单的、非正弦的固有模态函数(intrinsic mode decomposition, IMF) 和一个趋势项,从而实现信息数据进行分层处理的目的。其优势是根据自身的时间尺度特征来进行信号分解,无须预先设定任何基函数,具有较高的自适应性。Song 等^[12]提出了基于伪信噪比计算滤波参数。

设原始干涉图为 I , 基于形态学重构方法找到干涉图 I 的每一个局部极大值和极小值,并分别对其进行插值处理,形成上包络(upper envelope, UE) 和下包络(lower envelope, LE), 取这 2 个包络的平均值(mean envelope, ME), 即

$$ME = (UE + LE) / 2, \quad (8)$$

IMF 的计算公式为

$$F_i = \begin{cases} I - ME & i = 1 \\ F_{i-1} - ME_{i-1} & i \geq 2 \end{cases}, \quad (9)$$

式中: F_1 为从原始干涉数据分离出来的第一个 IMF, 重复以上步骤, 当 ME 接近 0 时, 停止。迭代关系为

$$R_i = I - F_i, \quad (10)$$

式中: R_i 为从原始干涉数据分离出的第 i 个趋势项。

当分解完成后, 定义一个干涉相位图, 即

$$I = \sum_{i=1}^n F_i + R_n, \quad (11)$$

式中 R_n 为残差。

相位和噪声的方差 $Pseudo_SNR$ 的表达式为

$$Pseudo_SNR = 10 \lg \frac{\sigma_{\varphi(I)}^2}{\sigma_{\varphi(F_1)}^2}, \quad (12)$$

$$b' = 1 - \frac{Pseudo_SNR - \min(Pseudo_SNR)}{\max(Pseudo_SNR) - \min(Pseudo_SNR)}, \quad (13)$$

则滤波参数 α 为

$$\alpha = \frac{\exp(b')}{\max[\exp(b)]}, \quad (14)$$

1.5 结构相似性

结构相似性(structural similarity, SSIM) 是一种全参考的图像质量评价指标, 分别从亮度、对比度和结构 3 方面度量图像相似性。Wang 等^[13]选择 SSIM 替代相干系数来计算滤波参数, 其关系表达式为

$$SSIM(I_1, I_2) = [l(I_1, I_2)]^{\beta_1} [c(I_1, I_2)]^{\beta_2} [s(I_1, I_2)]^{\beta_3}, \quad (15)$$

$$l(I_1, I_2) = (2\mu_{I_1}\mu_{I_2} + C_1) / (\mu_{I_1}^2 + \mu_{I_2}^2 + C_1), \quad c(I_1, I_2) = (2\mu_{I_1}\mu_{I_2} + C_2) / (\mu_{I_1}^2 + \mu_{I_2}^2 + C_2), \quad (16)$$

$$(17)$$

$$s(I_1, I_2) = (\sigma_{I_1 I_2} + C_3) / (\sigma_{I_1} \sigma_{I_2} + C_3), \quad (18)$$

$$MSSIM(I_1, I_2) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N SSIM(I_{1k}, I_{2k}), \quad (19)$$

$$\alpha = 1 - |P_{MSSIM}|, \quad (20)$$

式中: $l(I_1, I_2)$, $c(I_1, I_2)$ 和 $s(I_1, I_2)$ 分别为亮度、对比度和结构相似性对比函数; β_1 , β_2 和 β_3 分别为 $l(I_1, I_2)$, $c(I_1, I_2)$ 和 $s(I_1, I_2)$ 函数的权重; μ_{I_1} 和 μ_{I_2} 分别表示图像 I_1 和 I_2 的均值; σ_{I_1} 和 σ_{I_2} 分别为图像 I_1 和 I_2 的方差; $\sigma_{I_1 I_2}$ 为图像 I_1 和 I_2 的协方差; C_1 , C_2 和 C_3 为常数; N 为滑动窗口的像素个数; $MSSIM(I_1, I_2)$ 为平均结构相似性函数; P_{MSSIM} 为有效窗口内的 SSIM 均值。

2 滤波效果评价指标

为了评价算法的滤波效果,采用定性和定量2种方法进行评价。定性评价主要是通过目视解译判断图像的质量,通过观察噪声的抑制效果和条纹细节信息。定量评价是利用评价指标来描述图像质量,分别选择相位标准偏差(phase standard deviation, PSD)、均方根误差(root mean square error, RMS)、边缘保持指数(edge preservation index, EPI)和相位奇异点数目(residue point number, RPN)来定量描述滤波效果的好坏。

2.1 PSD

该指标能够反映出相位平滑度,偏差越小相位越平滑^[14]。PSD 计算公式为

$$PSD = \frac{\sum [|\tilde{\varphi}(i, j) - \tilde{\varphi}(i+1, j)| + |\tilde{\varphi}(i, j) - \tilde{\varphi}(i, j+1)|]}{\sum [|\varphi(i, j) - \varphi(i+1, j)| + |\varphi(i, j) - \varphi(i, j+1)|]}. \quad (24)$$

2.2 RPN

干涉相位图中相位奇异点的分布密度反映了干涉相位图质量的好坏,当相位奇异点的数目越少,说明干涉相位图质量越好^[17],其检测方法如图1。

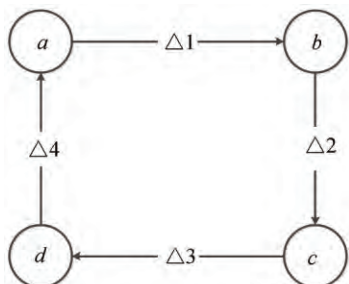


图1 相位奇异点检测
Fig.1 Detection of RPN

沿 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 方向对相邻4个点的相位差求和,即

$$PSD = \left\{ \frac{\sum_N [\varphi(i, j) - \bar{\varphi}(i, j)]^2}{N-1} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (21)$$

式中: $\varphi(i, j)$ 为干涉图相位值; $\bar{\varphi}(i, j)$ 为所选滑动窗口干涉图相位值的平均值; i 和 j 分别为像元的行列数。

2.2 RMS

该指标以原始不加噪声的干涉相位图作为参考,计算出滤波后干涉相位图和原始干涉相位图的相位偏差,偏差越小代表滤波结果的保真性越好^[15]。RMS 计算公式为

$$RMS = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{R-1} \sum_{j=0}^{C-1} (\Delta \varphi_{ij})^2}{RC}}, \quad (22)$$

$$\Delta \varphi_{ij} = \tilde{\varphi}(i, j) - \varphi(i, j), \quad (23)$$

式中: φ_{ij} 为滤波前干涉相位图(i, j)处相位值; $\tilde{\varphi}(i, j)$ 为滤波后干涉相位图(i, j)处的相位值; $\Delta \varphi_{ij}$ 为滤波前后干涉相位差。若 $\Delta \varphi_{ij} < -\pi$, 则将 $\Delta \varphi_{ij} + 2\pi$ 带入式(22); 若 $\Delta \varphi_{ij} \geq \pi$, 则将 $\Delta \varphi_{ij} - 2\pi$ 带入; 若 $-\pi \leq \Delta \varphi_{ij} < \pi$, 直接将 $\Delta \varphi_{ij}$ 带入即可; R 和 C 分别为干涉相位图的总行列数。

2.3 EPI

该指数能够反映滤波结果边缘信息的保持能力,其值越接近1,表明滤波后的干涉相位图和参考干涉相位图在梯度及边缘信息上越接近^[16]。EPI 计算公式为

$$S = \sum_{k=1}^4 \text{mod}(\Delta k), \quad (25)$$

式中: $\text{mod}()$ 为对 2π 取模; Δk 为相位差。当 $S=0$ 时,不存在残差点; 当 $S>0$ 时,存在正残差; 当 $S<0$ 时,存在负残差。

3 实验结果分析及精度评估

3.1 模拟数据实验

为了比较 Goldstein 滤波选取不同的滤波参数所获取的滤波效果,本文采用分形技术^[18]模拟出大小为 $512 \text{ 像素} \times 512 \text{ 像素}$ 的无噪声干涉相位图(图2(a))。根据时空相关模型模拟出相干图(图2(b)),最后进行相位缠绕加入噪声模拟出干涉相位图(图2(c))。

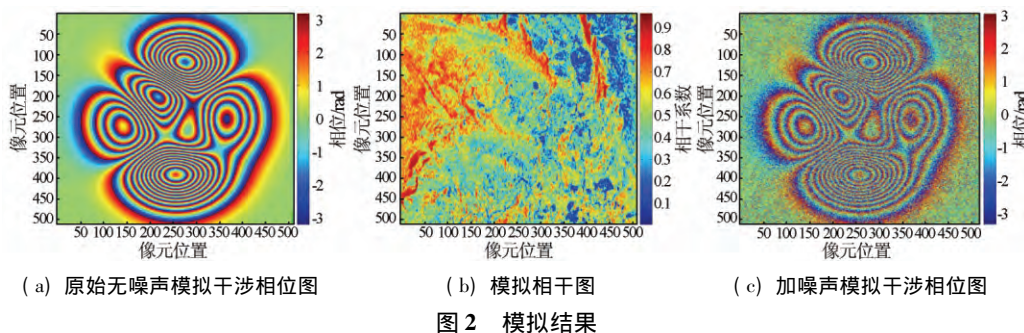


图 2 模拟结果

Fig. 2 Results of simulated images

由于旨在探讨不同滤波参数的选取对 Goldstein 滤波性能的影响,因此在利用 Goldstein 滤波方法对干涉相位图进行单次滤波后,不再进行其他的滤波操作。为了保持一致,所有算法都采用 32 像素 \times 32

像素的滤波窗口。图 3 分别为基于经验值(0.5)、相干系数、相位标准偏差、伪相干系数、伪信噪比和结构相似性计算的滤波参数对模拟干涉图滤波后的图像。

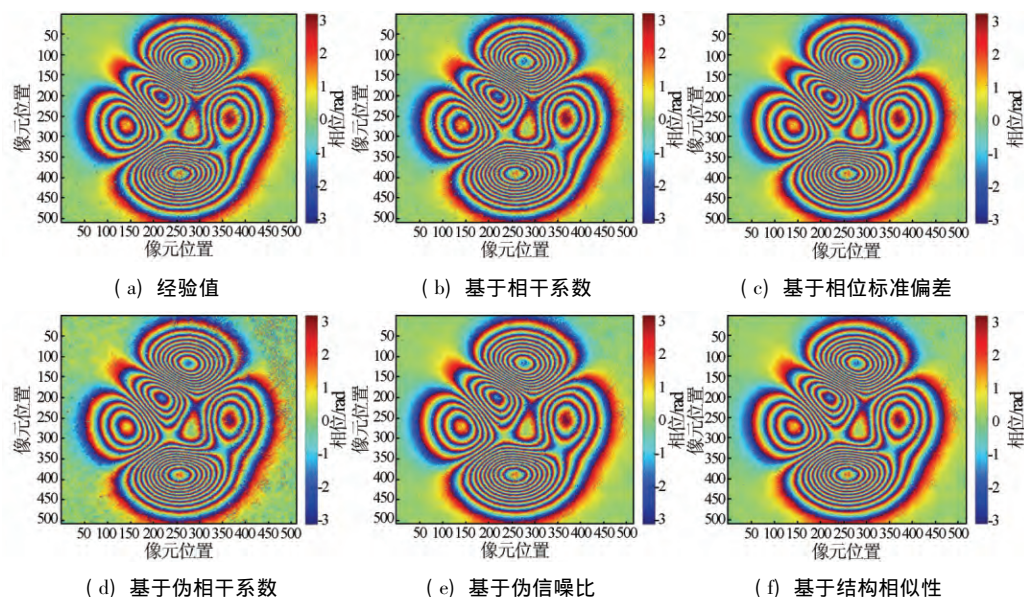


图 3 不同滤波参数对模拟数据的滤波结果

Fig. 3 Filtering results of simulated images with different filtering parameters

由图 3 可知,发现 6 种参数的设定均可滤掉大量的噪声,使干涉条纹趋势明显。定性对比滤波结果来看,特别是图像右上角低相干区域,基于经验值(0.5)、相干系数和伪相干系数的滤波结果仍存在大量的噪声,干涉条纹也不够光滑;相比而言,基于相位标准偏差、伪信噪比和结构相似性的滤波结果剩余噪声较少,提升了干涉相位的质量。

为了定量评价滤波结果,分别选取 PSD, RMS, EPI 和 RPN 对滤波结果进行定量描述,结果如表 1 所示。从整体来看,这些滤波参数均有抑制噪声的能力,尤其从 PSD 指标得到验证,基于相位标准偏差的滤波结果 PSD 值最小,这表明基于相位标准偏差的滤波结果较平滑,其次为基于结构相似性和基于伪信噪比的滤波结果,与基于相位标准偏差滤波的 PSD 值相差不大,可见这 3 种参数计算方法均能够获取相对平滑的干涉相位滤波图;对比 RMS 指

表 1 模拟干涉图滤波结果评价

Tab. 1 Effect evaluation of simulated phase diagram

α 计算方法	PSD	RMS	EPI	RPN
加噪干涉图	488 385.111 1	1.274 0	—	49 551
经验值(0.5)	282 021.662 7	0.523 7	2.988 4	3 084
相干系数	284 151.572 2	0.514 0	3.012 4	2 481
相位标准偏差	259 265.712 1	0.402 7	2.483 7	828
伪相干系数	311 998.156 5	0.606 7	3.668 5	5 067
伪信噪比	263 498.309 1	0.429 2	2.573 7	1 215
结构相似性	260 415.334 7	0.402 6	2.508 2	782

标发现,基于结构相似性、相位标准偏差和伪信噪比的滤波结果, RMS 值相对较小,表明这 3 种滤波参数所得的滤波结果与原始模拟干涉相位图相差不大,保真性较好,而其他 3 种滤波参数的滤波结果, RMS 值相对较大,保真性较差;从 EPI 指标可以看出,基于相位标准偏差的滤波结果 EPI 值更接近 1,表明其边缘信息保持能力较强,基于结构相似性和伪信噪比的滤波效果次之;从 RPN 指标可以发现,

基于结构相似性的滤波结果 RPN 值最小,说明其稳定性和可靠性较好,其次为基于相位标准偏差的滤波结果,RPN 值为 828,减少率为 98.32%。

综合各评价指标,可得出基于相位标准偏差的滤波结果能够在抑制噪声的同时保持较好的边缘信息,但其滤波后图像的稳定性与可靠性较弱;基于结构相似性的滤波结果虽然没有基于相位标准偏差

的相位平滑度好,但其滤波后的结果具有较好的稳定性和可靠性。

3.2 真实数据实验

3.2.1 C 波段 SAR 数据

选取意大利 Etna 火山的 ERS/C 波段 SAR 数据进行干涉实验,图像细节丰富,真实干涉图及对应相干图如图 4 所示。

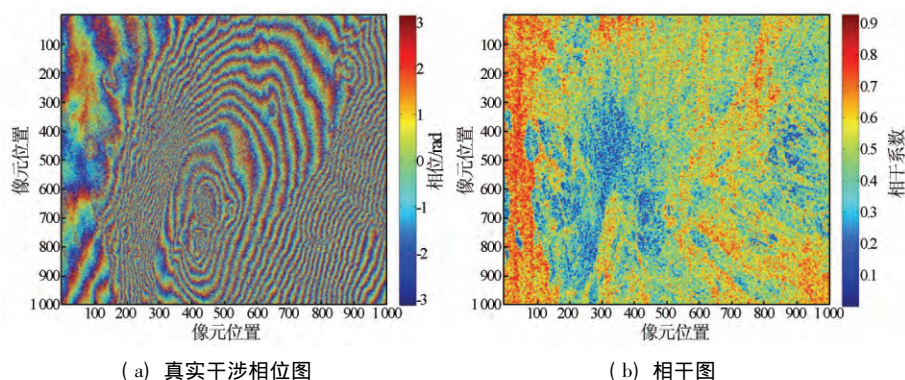


图 4 实验区域影像(C 波段)

Fig. 4 Images (C band) of study area

基于经验值(0.5)、相干系数、相位标准偏差、伪相干系数、伪信噪比和结构相似性计算出的滤波

参数进行 Goldstein 真实干涉图滤波处理后的图像分别如图 5 所示。参数设定和模拟数据一致。

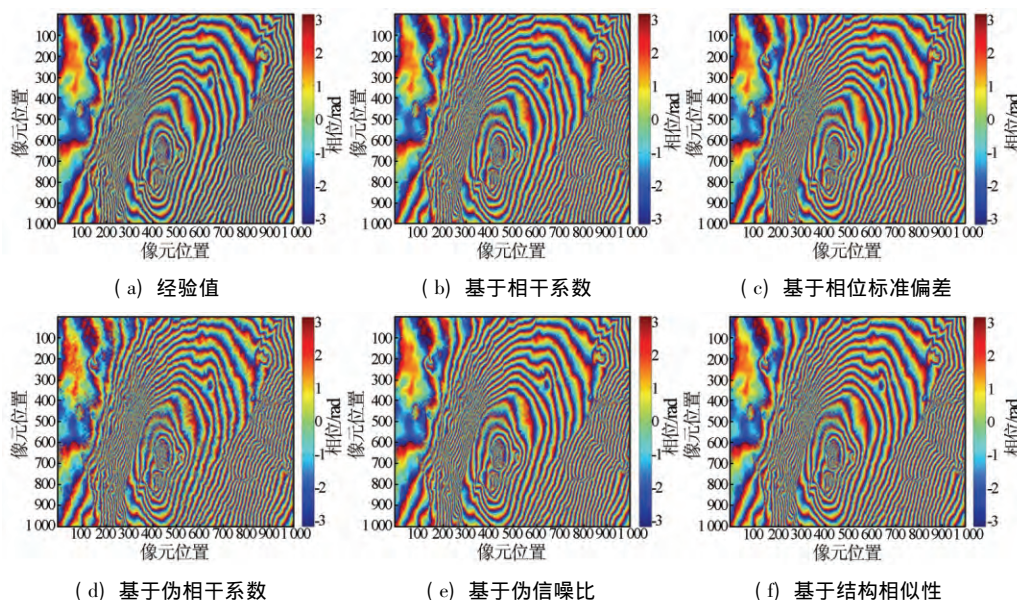


图 5 不同滤波参数对真实数据(C 波段)的滤波结果

Fig. 5 Filtering results of real images (C band) with different filtering parameters

从整体滤波效果定性分析,采用 6 种滤波参数均可在不同程度上抑制噪声,提升影像质量。对比滤波结果图像发现,这 6 种滤波参数的滤波结果在低相干区域仍然存在大量的噪声,基于经验值、相干系数和伪相干系数的滤波结果在边缘都存在丢失信息的情况,而基于相位标准偏差、伪信噪比和结构相似性滤波能够保持较好的边缘信息。

3.2.2 L 波段 SAR 数据

为进一步检验各滤波参数对 Goldstein 干涉相位图滤波性能结果的可靠性,本文又采用日本 Fuji 地区 L 波段的 ALOS PALSAR 数据进行干涉实验,垂直基线为 273 m,采用 GAMMA 软件进行干涉测量处理获得干涉图(如图 6)。该区干涉图像细节丰富,包含纯噪声区域、条纹密集区域和中度条纹区域。

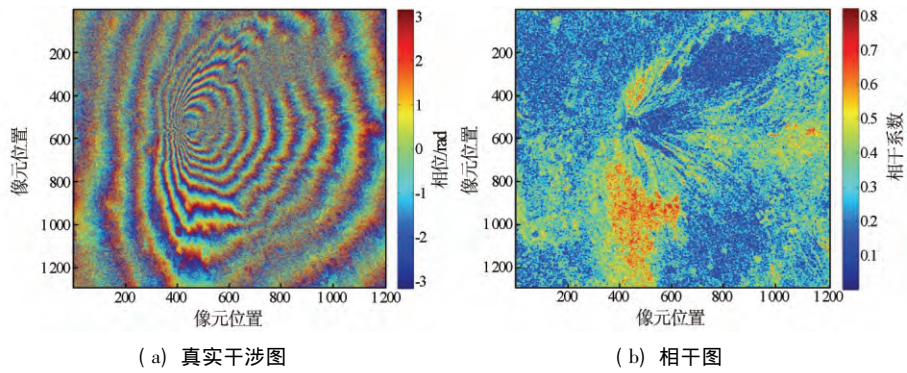


图 6 实验区域影像(L波段)

Fig. 6 Images (L band) of study area

基于经验值(0.5)、相干系数、相位标准偏差、伪相干系数、伪信噪比和结构相似性计算出的滤波

参数进行 Goldstein 真实干涉图滤波后的图像分别如图 7 所示。参数设定和模拟数据一致。

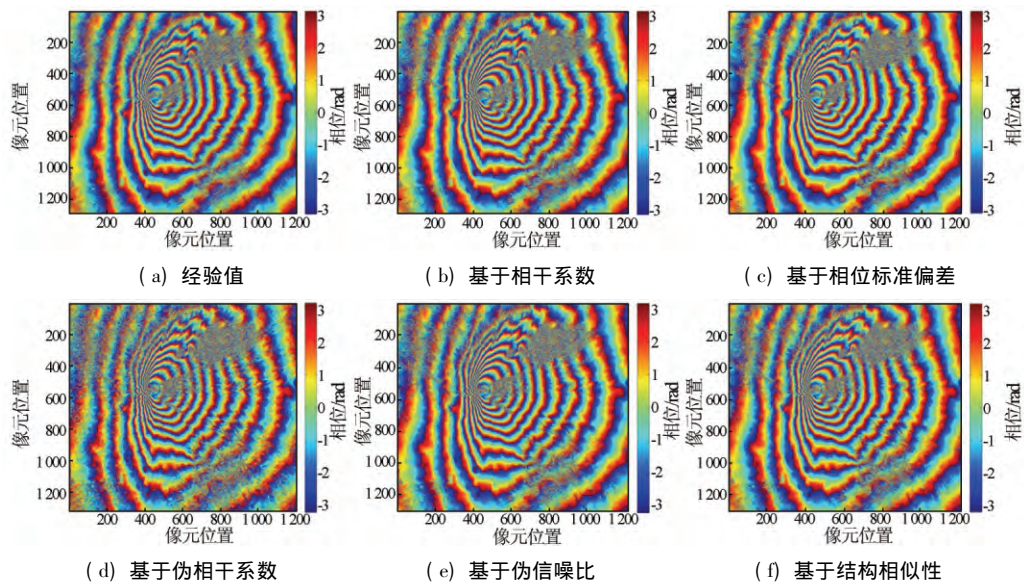


图 7 不同滤波参数对真实数据(L波段)的滤波结果

Fig. 7 Filtering results of real images (L band) with different filtering parameters

从整体滤波效果定性分析,6种滤波参数均可在不同程度上抑制噪声,相位颗粒噪声大量减少,干涉条纹趋势清晰,影像质量大幅度提高。但是放大干涉图可以看出,基于伪相干系数的滤波算法仍存在大量的噪声;基于经验值、相干系数和伪相干系数的滤波结果虽然在一定程度上抑制了噪声,但在边缘都存在丢失信息的情况;而基于相位

标准偏差、伪信噪比和结构相似性滤波能够保持较好的边缘信息,不过在低相干区域仍然存在较多的噪声。

3.2.3 真实数据滤波效果定量评价

为了定量评价真实数据滤波结果,同样选择 PSD 和 RPN 对滤波结果进行定量描述,结果如表 2 所示。

表 2 真实数据滤波结果评价

Tab. 2 Effect evaluation of real phase diagram

α 计算方法	意大利 Etna 火山(ERS SAR)		日本 Fuji 火山(ALOS PALSAR)	
	PSD	RPN	PSD	RPN
原始干涉图	2 067 935.756 5	192 594	3 244 598.703 7	328 022
经验值	1 346 684.205 6	40 609	1 943 126.170 5	94 297
相干系数	1 368 080.957 1	38 324	1 896 392.754 0	91 439
相位标准偏差	1 237 380.454 6	29 110	1 311 997.895 2	67 137
伪相干系数	1 422 402.133 0	47 506	2 252 217.672 3	132 477
伪信噪比	1 255 771.932 8	30 344	1 838 473.267 5	93 457
结构相似性	1 251 396.008 3	29 882	1 848 474.377 5	96 131

分析表 2 可知,滤波参数 α 对不同波段的 SAR 数据形成的干涉图滤波效果相差不大。基于这 6 种滤波参数的滤波结果 PSD 值相对于原始干涉图明显减少,其中基于相位标准偏差滤波的 PSD 值最小,说明基于相位标准偏差的滤波结果光滑程度最高。从 RPN 值的减少率来看,基于相位标准偏差滤波的减少率最高,其次是基于结构相似性和伪信噪比滤波,伪相干系数滤波的减少率最低。总体上,基于相位标准偏差的滤波结果在抑制噪声的同时较好地维持图像分辨率,更加有利于 InSAR 后续处理的稳定性和可靠性;基于结构相似性滤波虽然比基于伪信噪比的滤波结果具有较高平滑度,但保真性却没有基于伪信噪比好,从而降低了 InSAR 后续处理的稳定性和可靠性;基于剩余 3 种滤波参数的滤波效果相对欠佳。因此,应该根据实际滤波需求选择合适的滤波参数。

4 结论

针对经典的 Goldstein 干涉相位图滤波的滤波参数 α 选取存在较大主观性,本文选取当前常用的及最新的自适应滤波参数 α ,以 32 像素 \times 32 像素的滤波窗口对模拟和真实数据进行滤波实验,从定性和定量 2 个方面系统分析了基于经验值、相干系数、相位标准偏差、伪相干系数、伪信噪比和结构相似性 6 种不同滤波参数对 Goldstein 干涉相位滤波效果。研究结果表明:

1) 6 种 Goldstein 滤波参数对不同波段的滤波结果均能在一定程度上抑制噪声,使干涉条纹趋势清晰,提升了干涉图的质量。

2) 基于相位标准偏差的滤波方法能够在抑制噪声的同时具有较好的保真性和边缘保持能力;基于结构相似性和伪信噪比的滤波效果次之,特别在维持图像分辨率方面;其余 3 种滤波参数的滤波效果欠佳。

3) 由于不同的干涉图在噪声和条纹分布上均有不同的特征,在不同的滤波窗口和滤波次数下,不同的 Goldstein 滤波参数将对滤波产生不同的结果,因此,采用何种滤波参数以及如何将不同的滤波参数组合,以获得更优的滤波效果,是未来需要着重考虑的问题。

参考文献(References):

- [1] 屈春燕,张桂芳,单新建,等. 2010 年青海玉树地震同震-震后形变场特征及演化过程[J]. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2280 - 2291.
- [2] 乔学军,李淑荪,王琪,等. 利用 InSAR 技术获取三峡地区的数字高程模型[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 32(2): 122 - 127.
- [3] Qiao X J, Li S S, Wang Q, et al. Acquisition of DEM of three gorges area by InSAR[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2003, 32(2): 122 - 127.
- [4] Poreh D, Jodice A, Riccio D, et al. Railways' stability observed in Campania (Italy) by InSAR data[J]. European Journal of Remote Sensing, 2016, 49(1): 417 - 431.
- [5] Zhou J M, Li Z, He X B, et al. Glacier thickness change mapping using InSAR methodology[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(1): 44 - 48.
- [6] 赵文胜,蒋弥,何秀凤. 干涉图像第二类统计 Goldstein 自适应滤波方法[J]. 测绘学报, 2016, 45(10): 1200 - 1209.
- [7] Zhao W S, Jiang M, He X F. Improved adaptive Goldstein interferogram filter based on second kind statistics[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(10): 1200 - 1209.
- [8] Baran I, 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): 2114 - 2118.
- [9] Zhao C Y, Zhang Q, Ding X L, et al. An iterative Goldstein SAR interferogram filter[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(11): 3443 - 3455.
- [10] 易辉伟,朱建军,李健,等. InSAR 矿区形变监测的边缘保持 - Goldstein 组合滤波方法[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(11): 3185 - 3192.
- [11] Yi H W, Zhu J J, Li J, et al. An edge preservation - Goldstein filter for InSAR interferograms used in monitoring deformation of mining area[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(11): 3185 - 3192.
- [12] Wang Q, Huang H, Yu A, et al. An efficient and adaptive approach for noise filtering of SAR interferometric phase images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(6): 1140 - 1144.
- [13] Goldstein R M, Werner C L. Radar interferogram filtering for geophysical applications[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(21): 4035 - 4038.
- [14] 于晓歆,杨红磊,彭军还. 一种改进的 Goldstein InSAR 干涉图滤波算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(9): 1051 - 1054.
- [15] Yu X X, Yang H L, Peng J H. A modified Goldstein algorithm for InSAR interferogram filtering[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(9): 1051 - 1054.
- [16] Song R, Guo H, Liu G, et al. Improved Goldstein SAR interferogram filter based on empirical mode decomposition[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 11(2): 399 - 403.
- [17] Wang Y, Huang H F, Dong Z, et al. A dual-domain interferometric phase filter[J]. Remote Sensing Letters, 2015, 6(12): 962 - 971.
- [18] Zou W, Li Z, Ding X, et al. A quantitative measure for the quality of InSAR interferogram based on phase differences[J]. Photogram-

- metric Engineering and Remote Sensing, 2004, 70(10): 1131 – 1138.
- [15] 赵 诣, 蒋 弥, 杨 川, 等. InSAR 干涉图滤波方法对比[J]. 测绘科学, 2017, 42(6): 149 – 154.
Zhao Y, Jiang M, Yang C, et al. Comparison between filtering methods for InSAR interferogram [J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, 42(6): 149 – 154.
- [16] 韩春明, 郭华东, 王长林, 等. 保持边缘的 SAR 图像滤波方法[J]. 高技术通讯, 2003, 13(7): 11 – 15.
Han C M, Guo H D, Wang C L, et al. Edge – preserving filter for SAR images [J]. High Technology Letters, 2003, 13(7): 11 – 15.
- [17] 廖明生, 林 琨, 张祖勋, 等. INSAR 干涉条纹图的复数空间自适应滤波[J]. 遥感学报, 2003, 7(2): 98 – 105.
Liao M S, Lin H, Zhang Z X, et al. Adaptive algorithm for filtering interferometric phase noise [J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(2): 98 – 105.
- [18] Hanssen R F. Radar interferometry: Data interpretation and error analysis [J]. Journal of the Graduated School of the Chinese Academy of Science, 2001, 2(1): 577 – 580.

An analysis of the influence of filtering parameter on the performance of Goldstein InSAR interferogram filter

WANG Nianqin¹, QIAO Dejing¹, FU Xiyu^{2,3}

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To tackle the subjectivity of select filter parameters in Goldstein InSAR interferogram filtering, the authors adopted the experience value as Goldstein filter algorithm, and then introduced the coherent coefficient, the phase standard deviation, the pseudo coherent coefficient, the pseudo signal – to – noise ratio and the structure similarity as the adaptive filtering parameter of Goldstein interferogram filtering. After that, the authors used the simulation and the real interferometric data and carried out the detailed appraisal and the contrast analysis of the filter result. The results show that six filter parameters could suppress the noise and improve the quality of interference effectively. Among them, using the pseudo signal – to – noise as the filter parameters not only could suppress the noise and have more significant advantages in the edge information and fine pitch. Using structural similarity and pseudo signal – to – noise ratio can also achieve better filtering results. The filter result of other three kinds of filter parameter is relatively unsatisfactory.

Keywords: interferometric synthetic aperture Radar (InSAR); interferogram filtering; noise; Goldstein filter; filtering parameters

(责任编辑: 陈 理)