

doi:10.3788/gzxb20184712.1212001

局部噪声斑块 InSAR 干涉图相位解缠算法

郭媛, 杜松英

(齐齐哈尔大学 计算机与控制工程学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘 要:针对干涉合成孔径雷达干涉图由于局部噪声、阴影或条纹断裂等原因导致残差点集中、产生不可靠数据点噪声斑块,从而引起相位解缠困难的情况,提出基于掩膜滤波的质量图引导权值的四向加权最小二乘相位解缠迭代算法.首先对噪声斑块区域进行掩膜滤波处理,有效保留该区域真实相位信息,防止大误差传播.再结合最大相位梯度和相位导数变化的质量图法来定义权值,构造新的四项最小二乘迭代法,并用其对掩膜区域进行填充,抑制误差传递、提高运算速度、改善过度平滑作用.模拟及真实数据实验表明,该方法解缠精度高,能真实还原干涉合成孔径雷达干涉图局部噪声斑块的原始相位.与传统最小二乘法相比,其差分方程矩阵带宽变大,填充效果更好,迭代次数更少,精确度更高,解决了因噪声集中导致干涉合成孔径雷达图像解缠难度大的问题.

关键词:光学测量;相位解缠;干涉条纹;局部噪声;质量图;迭代

中图分类号:O436.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)12-1212001-8

Phase Unwrapping Method of InSAR Interferogram with Local Noise Patch

GUO Yuan, DU Song-ying

(College of Computer and Control Engineering, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China)

Abstract: Four-direction weighted least squares phase unwrapping iterations algorithm is proposed based on regional mask filtering and the method of quality map leading weigh to solve the problem that interferometric synthetic aperture radar interferogram is difficult for phase unwrapping due to local noise, shadows or stripe breaks, which result in residual focus and unreliable data patches. Firstly, the noise patch region is masked and filtered. Therefore the real phase information is preserved and the error propagation is prevented effectively. Then, the four-direction least-squares iteration method, which can redefine the weight value by using the quality map method which can describe the maximum phase gradient and the change of phase derivative, is used to fill the mask region to suppress the error propagation, increase the computing speed and improve the over-smoothing effect. Simulation and real data experiments show that the proposed method has high unwrapping accuracy and can restore the original phase of the local patch of interferometric synthetic aperture radar interferogram. Compared with the traditional least squares method, it has the advantages of larger bandwidth of the difference equation matrix, better filling effect, less number of iterations and higher accuracy, which can solve the difficulty of interferometric synthetic aperture radar image unwrapping caused by noise concentration.

Key words: Optical measurement; Phase unwrapping; interference fringe; Local noise; Quality map; Iteration

OCIS Codes: 120.5050; 120.6165; 100.5088; 100.3020; 100.2650

0 引言

干涉合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)^[1]是在合成孔径雷达(Synthetic

基金项目:国家自然科学基金(No. 61872204),黑龙江省自然科学基金(No. F2017029),教育部留学回国人员科研启动基金和黑龙江省教育厅面上项目(No. 12521600)资助

第一作者:郭媛(1974-),女,教授,博士,主要研究方向为光学检测及信息处理. Email:guoyuan171@126.com

收稿日期:2018-08-14; **录用日期:**2018-10-11

<http://www.photon.ac.cn>

Aperture Radar, SAR)基础之上发展起来的对地测量技术.通过对地表发射天线信号,接收地表反射回来的回波信号获取干涉图像,经相位解缠,从干涉条纹中获取地形高程数据,测算出地表形变.随着计算机应用技术的迅猛发展,InSAR 技术经历了跨越式发展,被广泛应用于地质灾害预测、地形地貌测绘、军事导向和生活信息获取等领域^[2],具有重要的应用价值.

InSAR 技术包括图像配准、去平地效应、干涉图滤波、相位解缠等步骤^[3].相位解缠作为其中一个环节,其算法优劣直接影响测量精度,是整个 InSAR 测量技术成功与否最为关键的部分^[4-5].由于设备固有噪声和自然环境噪声影响,局部相位残差点增多,形成不可靠数据斑块,使该区域相位解缠出现漏解或错解,导致 InSAR 图像恢复失败,是 InSAR 相位解缠算法中需要克服的一个难题^[6-7].

相位解缠技术始于 20 世纪 60 年代,到 80 年代得到了极大发展,许多新的相位解缠算法被提出.1986 年 GOLDSETIN R M 等提出了与路径相关的枝切法相位解缠算法^[8].1991 年 BONE D J 用质量图指导相位解缠算法,进一步优化了路径积分算法^[9].1994 年为抑制误差传递,ROMERO L A 和 GHIGLIA D C 等在非加权最小二乘相位解缠算法基础上提出加权最小二乘相位解缠算法^[10].随后 PRITT M D、ROMERO L A 等对算法进行改进,使解缠所需时间大大减少^[11].1996 年 COSTANTINI M 综合了路径积分和最小二乘算法的优点提出了基于网络流的相位解缠算法,解决了一致性和精确性兼顾的问题^[12].2000 年 CARBALLO G F 等改进了网络流算法,把概率费用函数引入到网络流相位解缠算法模型中^[13].2006 年刘国林等提出基于尔曼滤波的相位解缠算法^[14],抑制了局部数据误差过大导致解缠失败的影响.2007 年 HOOPER A 等把相位解缠发展到三维情况,在 InSAR 的时间序列中运用三维相位解缠^[15]技术.2012 年钱晓凡将剪切干涉计量原理引入到加权最小二乘相位解缠算法中,解决了相位梯度过大导致欠采样问题的出现^[16].2013 年郭媛等提出对 k 值直接求取的最小二乘相位解缠算法,不仅提高了解缠精度,更大大提高了运算效率^[17].在过去的几十年里,相位解缠技术一直是研究的热点问题,而局部相位解缠问题有特定的复杂性并受多种因素影响,任何一种算法都有其相应的适应性,要根据实际情况选取相应的解缠算法.

针对 InSAR 干涉图局部区域噪声斑块的问题,本文提出将掩膜滤波技术引入四向加权最小二乘相位解缠算法,以质量图为指导设置四向最小二乘法的相位数据权重,再利用其提供平滑解的特点,通过多次迭代,将掩膜滤波的噪声斑块区域进行数据拟合,得到匹配完好的解缠相位,以解决残差点相对集中难以直接处理的相位解缠问题.

1 掩膜滤波

理论上通过 InSAR 技术中的相位解缠可大范围、高精度地还原地表形貌并测出高程形变信息,但实际中往往存在诸多因素制约相位解缠的准确性,从而影响 InSAR 测量的精度.特别是干涉图局部相位出现噪声过大、阴影或者条纹断裂导致高噪声斑块区域的情况,给相位解缠造成很大困难.

滤波作为相位解缠的前步,其效果好坏直接影响相位解缠的成败.在最小二乘相位解缠中,噪声会引起误差的空间传播,导致解缠出来的相位误差太大;在 N 步相移法解缠中,噪声将导致解缠相位出现严重的“拉丝”现象;在质量图导引算法解包中,噪声会造成相位突变,在解缠相位中出现“黑点”等.因此,提高滤波的有效性和相位计算的准确性,同时增强可靠性是相位信息提取的难点和重点^[18,19].

针对 InSAR 干涉图局部噪声斑块情况,对噪声集中的区域先进行掩膜滤波处理,最大程度保留噪声集中区域的真实相位,然后利用多次迭代的解缠算法对掩膜滤波区域进行填充,保证较大噪声处的误差在解缠时不被传递,保持与原相位拟合.

将含复杂噪声斑块的真实 InSAR 图用中值滤波、基于梯度的自适应方法滤波、均值滤波和先梯度—后均值四种滤波算法掩膜滤波,并将结果进行比较,如图 1.

从噪声斑块区的几种掩膜滤波结果可以看出,单纯基于梯度的自适应方法的平滑性不好,在包裹图像的相位跳变边缘上不能得到平滑的曲线,部分区域模糊,滤波效果不好,其他三种方法都能得到明显的平滑曲线.通过滤波效果评价标准的三个参数来定量分析各种滤波方法的优劣,包括相位标准偏差(Phase standard deviation, PDS)(平滑性,值越小,越平滑)、相位奇异值(残差点数,越少越好)和边缘保持指数(Edge retention index, EPI)(越接近于 1 越好),结果见表 1.

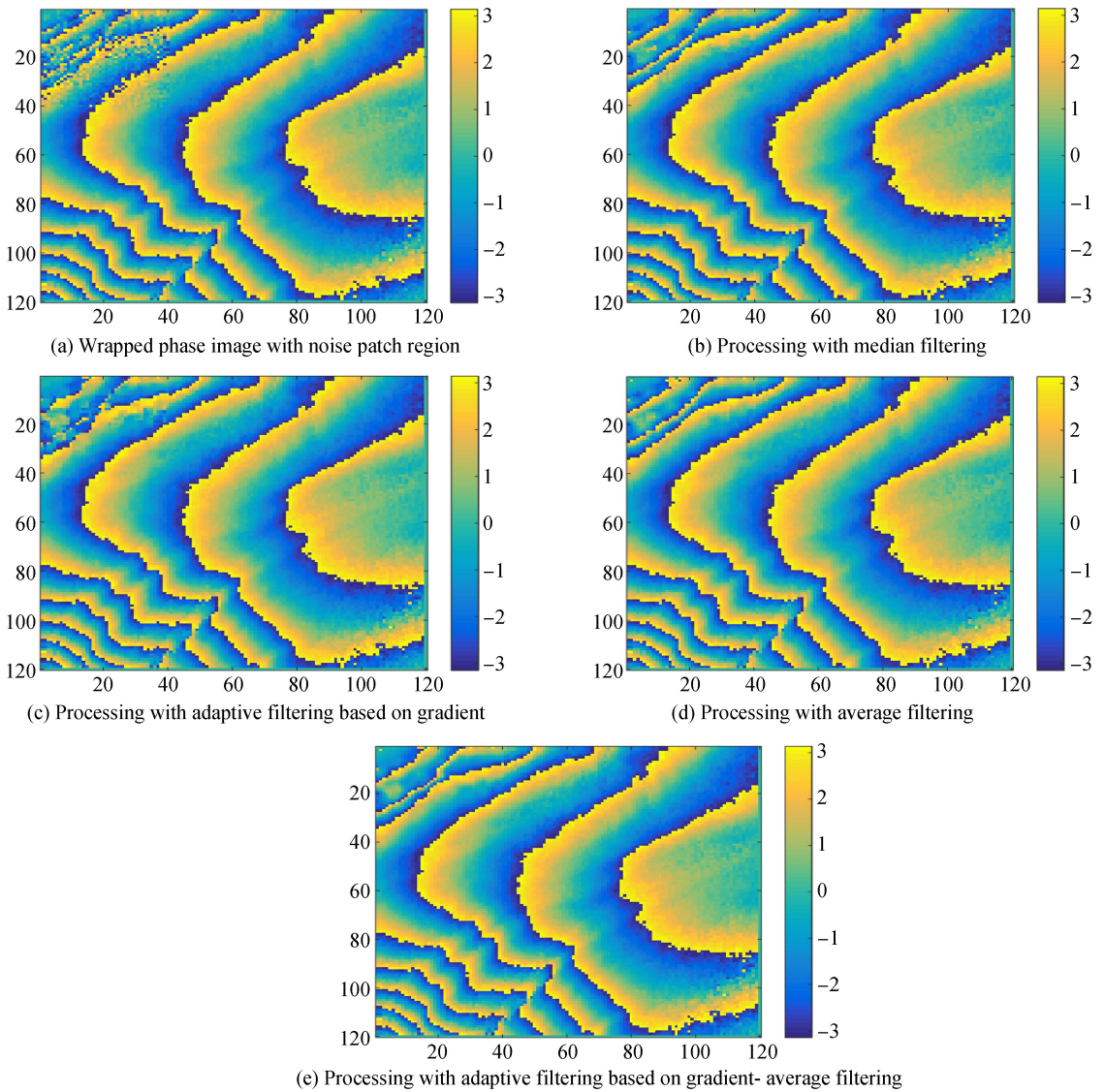


图 1 InSAR 真实图像的几种掩膜滤波方法比较
Fig.1 Comparison of the several mask filtering methods in InSAR real image

表 1 几种滤波方法的比较
Table 1 Comparison of the several mask filtering methods

Filtering method	Median filtering	Adaptive filtering based on gradient	Average filtering	Adaptive filtering based on gradient-average filtering
PDS	7.058 8	7.100 7	7.048 9	7.060 3
Residues number	33	55	27	27
EPI	1.483 5	1.335 6	1.341 0	1.274 7

从表 1 数据来看,梯度的自适应方法比其他三种方法的平滑性要差,与图 1 分析所得结果对应.均值滤波与分先梯度后均值的滤波方法都能得到较少的残差点数,滤波后的图像解包更平滑,防止因残差点过多导致解包困难的现象.从边缘保持指数来看,梯度的自适应方法对于边缘的保持优于中值方法和均值方法,而基于先梯度后均值的方法在边缘保持指数上优于其他所有算法.真实 InSAR 图像含噪声情况复杂,很难用一种方法取得理想效果,往往需要几种方法的综合反复试用来达到滤除噪声的作用,如采用先梯度后均值的滤波方法总体上好于其他方法.

2 相位解缠

区域掩膜滤波方法保证了 InSAR 图像噪声集中处的大误差不会在最小二乘迭代解缠时被传递,但当解缠穿过相位不一致区域而非绕过时,整个图像的误差传递仍不可避免,同时最小二乘还存在平滑真实相位的缺点,使解缠相位出现峰削尖、坡变缓的趋势。

为了提高解缠精度,采用加权四向最小二乘,以质量图为指导设置四向最小二乘相位数据权重,并根据权重顺序进行解包裹以避免误差传递。在水平和垂直 45° 处增加两个方向,与传统最小二乘相比,差分方程矩阵带宽变大,填充效果更好,填充速度更快,减少了一半的迭代次数。该方法有效改善解缠时的误差传递和补偿最小二乘的过度平滑作用,能很好地解决因噪声集中导致解缠难度增加的问题。

InSAR 干涉测量中,得到的包裹的相位函数为 $\varphi_{i,j}$,取值范围为 $-\pi \leq \varphi_{i,j} \leq \pi$,其真实相位为 $\phi_{i,j}$,并有

$$\phi_{i,j} = \varphi_{i,j} + 2\pi k_{i,j} \quad (1)$$

式中 $k_{i,j}$ 为包裹周期。

对包裹相位,定义 p, q 两个方向为与 x, y 方向顺时针成 $\pi/4$ 方向,并计算四个方向的一阶差分 $\Delta_{i,j}^{x,y,p,q}$,采用四向最小二乘使解缠相位对已知的原相位主值拟合,解得的相位斜率与包缠相位斜率尽可能逼近,使各方向上解缠相位的一阶差分 and 包缠相位一阶差分的差值绝对值最小,即

$$\min\{J\} = \min \left\{ \sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-1} |\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j} - \Delta_{i,j}^x|^2 + \sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-1} |\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j} - \Delta_{i,j}^y|^2 + \sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-1} |\phi_{i+1,j+1} - \phi_{i,j} - \Delta_{i,j}^p|^2 + \sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-1} |\phi_{i+1,j-1} - \phi_{i,j} - \Delta_{i,j}^q|^2 \right\} \quad (2)$$

此问题可化为求最小值问题,对式(2)求离散偏导,并令偏导数为 0,可得泊松方程

$$\rho_{i,j} = (\phi_{i+1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i-1,j}) + (\phi_{i,j+1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j-1}) + (\phi_{i+1,j+1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j-1}) + (\phi_{i+1,j-1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i-1,j+1}) \quad (3)$$

其中 $\rho_{i,j} = \Delta_{i,j}^x - \Delta_{i-1,j}^x + \Delta_{i,j}^y - \Delta_{i,j-1}^y + \Delta_{i,j}^p - \Delta_{i-1,j-1}^p + \Delta_{i,j}^q - \Delta_{i-1,j+1}^q$

采用四向最小二乘改善迭代速度和填充效果,但其固有的过度平滑和迭代过程中误差的传递问题仍需进一步解决,将最大相位梯度质量图和相位导数偏差质量图相结合,为四向最小二乘法的相位数据设置权重。最大相位梯度质量图能测量一定区域内包裹相位数据的梯度最大值,具有一定的残差点敏感性,但它有时会将没有残差点的坡度变化快的相位数据可靠区域标记为低质量。相位导数方差质量图利用一定模板内的统计信息克服最大相位梯度图的缺点,是一种相对可靠的质量图^[16-19]。利用两种方法的优点,弥补原有单一方法的不足,得到了一种新的可靠的质量图法。

将式(3)改成加权形式为

$$\rho_{i,j} = A_{i,j}(\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j}) - A_{i-1,j}(\phi_{i,j} - \phi_{i-1,j}) + B_{i,j}(\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j}) - B_{i,j-1}(\phi_{i,j} - \phi_{i,j-1}) + C_{i,j}(\phi_{i+1,j+1} - \phi_{i,j}) - C_{i-1,j-1}(\phi_{i,j} - \phi_{i,j-1}) + D_{i,j}(\phi_{i+1,j-1} - \phi_{i,j}) - D_{i-1,j+1}(\phi_{i,j} - \phi_{i-1,j+1}) \quad (4)$$

式中, A, B, C 和 D 为权重项。

式(4)中权重项可确定为

$$\begin{cases} A_{i,j} = \min(q_{i+1,j}^2, q_{i,j}^2) \\ B_{i,j} = \min(q_{i,j+1}^2, q_{i,j}^2) \\ C_{i,j} = \min(q_{i+1,j+1}^2, q_{i,j}^2) \\ D_{i,j} = \min(q_{i+1,j-1}^2, q_{i,j}^2) \end{cases} \quad (6)$$

式中 q 为包裹相位图对应的图,可由式(7)确定,即

$$q_{m,n} = \max(\max(|\Delta_{i,j}^x|)_{k \times k}, \max(|\Delta_{i,j}^y|)_{k \times k}) \times \frac{\sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta_{i,j}^x - \Delta_{m,n}^x)^2} + \sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta_{i,j}^y - \Delta_{m,n}^y)^2}}{k^2} \quad (7)$$

$$q_{m,n} = \max\{\max\{|\Delta_{i,j}^x|\}_{k \times k}, \max\{|\Delta_{i,j}^y|\}_{k \times k}, \max\{|\Delta_{i,j}^p|\}_{k \times k}, \max\{|\Delta_{i,j}^q|\}_{k \times k}\}$$

式中以 (m, n) 为中心的方形窗口尺寸 k 为 3.

采用离散余弦变换 (Discrete Cosine Transform, DCT) 求解, 将解缠过程转换为采用 DCT 求解泊松方程的问题, 即可恢复 InSAR 真实相位.

3 实验与讨论

3.1 模拟仿真

为验证本文方法在的可行性和有效性, 选取条纹密度较高的模拟工程实践中出现的 4 倍 peaks (512 pixel \times 512 pixel) 函数进行仿真, 结果如图 2.

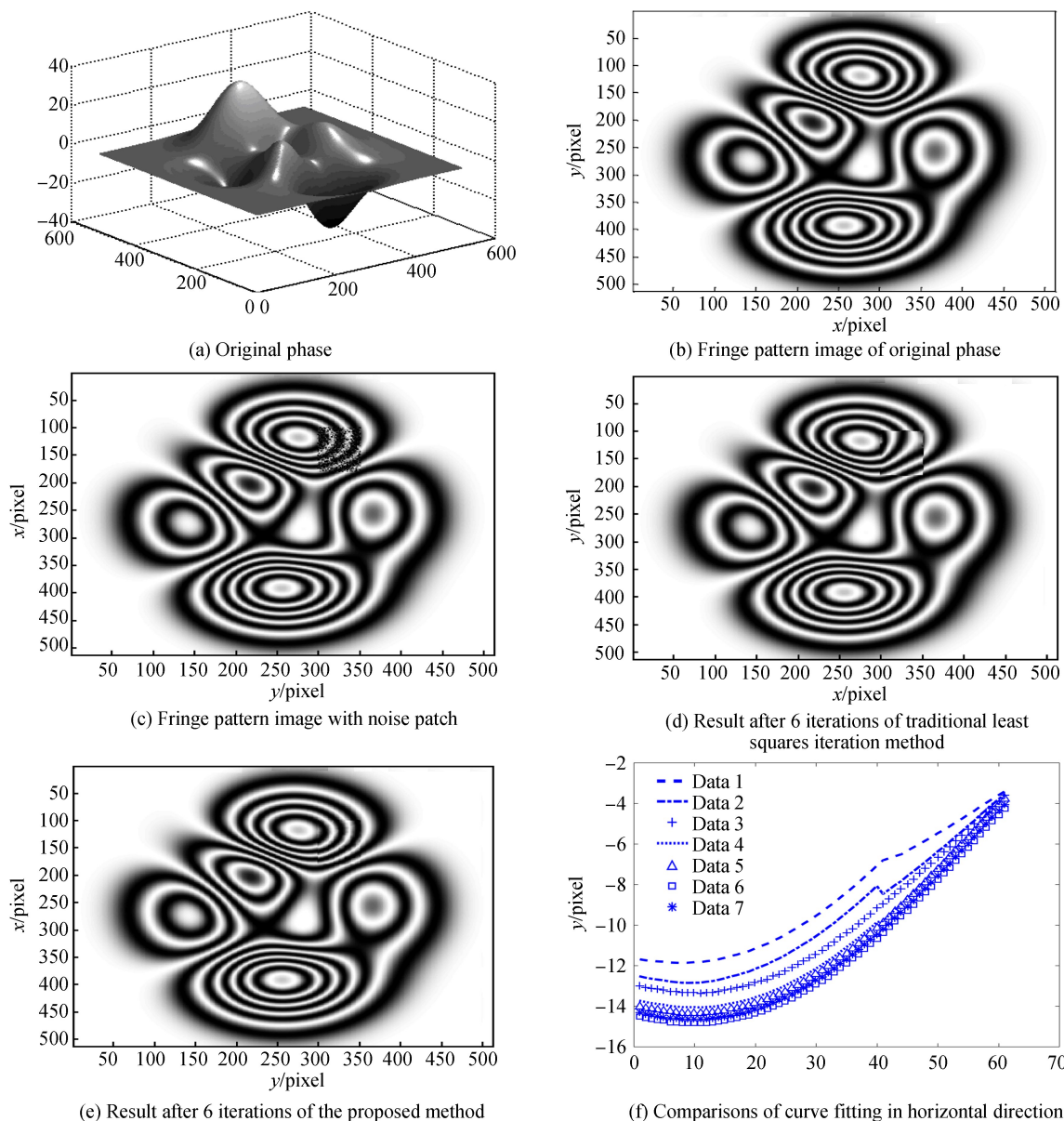


图 2 6 次迭代的相位解缠结果比较
Fig.2 Comparison of phase unwrapping result of 6 iterations

图 2 (a)、(b) 分别为原始相位图和原始条纹图; 图 2 (c) 为含噪声斑块的包缠相位, 其噪声强度为方差 0.8 的随机噪声, 空间分布为 $(100 \cdots 175, 300 \cdots 350)$, 和正常环境下测量的 InSAR 实际含噪情况类似; 图 2 (d) 为经 6 次传统最小二乘迭代后的结果, 可以看出拟合区域与原包缠相位匹配不是很好, 误差明显; 图 2 (e) 为经本文方法 6 次迭代后的效果, 在掩膜区域包缠相位拟合完好, 取得了很好的效果; 图 (f) data1 至 data6 分别

表示采用本文方法从第 1 次至第 6 次的迭代结果(截取范围为第 160 行,第 320 列至 390 列),可以看出随着迭代次数的增多,解缠相位越来越趋近于真实相位,在迭代次数达到第 6 次时,已经基本和原始相位(data7)保持一致。

从仿真结果可以看出,本文方法能够在较高精确性的前提下,较好地解决局部噪声斑块的解缠问题.与传统最小二乘迭代法的解缠效果相比,经掩膜滤波和质量图法重新定义权值的四向加权最小二乘迭代法效果更好,填充速度更快,减少了一半的迭代次数,且解缠结果也较好。

为定量考查本文方法的效果,比较了两种方法迭代过程的误差,见表 2。

表 2 两种方法的误差比较
Table 2 Comparison of the error of two methods

Method and iteration number	Minimum error (abs)/rad	Maximum error (abs)/rad	Mean error(abs)/rad
3 iterations of the least square method	1.900 3	5.884 7	4.334 8
6 iterations of the least square method	1.359 9	5.716 3	3.741 2
3 iterations of the proposed method	0.158 9	3.849 0	2.658 2
6 iterations of the proposed method	0.002 4	0.762 5	0.129 1

从表 2 可以看出,用传统最小二乘迭代法,无论是 3 次迭代还是 6 次迭代,误差均比本文方法大很多.其中,本文方法 3 次迭代的拟合曲线平均误差约为传统最小二乘迭代法的 1/2,6 次迭代的拟合曲线平均误差不到传统最小二乘迭代法 1/40,本文方平均误差小于 0.5 rad,最大误差不到 1 rad。

3.2 InSAR 原始数据实验

为了进一步验证本文方法的有效性,采用像元为 140×132 的 InSAR 真实数据生成的干涉图,并将本文方法和常用的 InSAR 干涉图解缠方法进行比较,其解缠结果如图 3 所示。

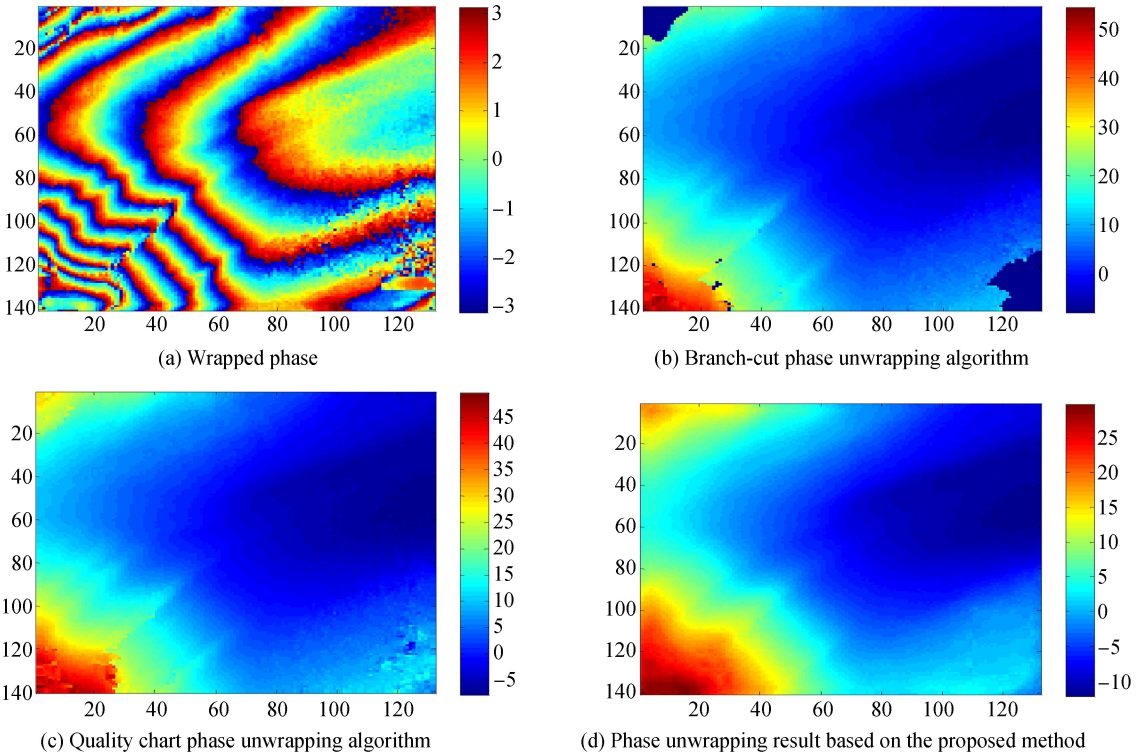


图 3 相位解缠结果比较

Fig.3 Comparisons of phase unwrapping results

图 3(a)为包缠相位,可以看出中间及右上角部分相位比较清晰,但右下角条纹因噪声引起的不可靠数据点较为集中,包缠相位难以识别形成模糊的区域.由于枝切法解缠过程无法穿过右下角和左上角的枝切线,导致解缠相位出现未被处理的两处孤立区域,如图 3(b).质量图法的相位解缠结果如图 3(c),解缠效果较差的点主要集中在右下角.本文通过对难以解缠的相元进行掩膜滤波处理,采用提出的质量图法重新定义

权值加权四向最小二乘迭代算法进行拟合,其拟合结果如图 3(d)所示,可见填充取得了良好的效果,解决了局部噪声较为集中难以解出真实相位的问题。

表 3 分别从解缠质量 ϵ 值、运行时间、不连续点百分比、反缠绕均方根 σ 等几方面分析枝切法、质量图法和本文提出的解缠算法的运行效率和解缠质量。

表 3 相位解缠结果分析
Table 3 Analysis for phase unwrapping results

Unwrapping algorithm	ϵ	Running time/s	discontinuity point	σ/rad
Branch-cut	0.197 2	3.70	1.48%	5.029 7
Quality chart	0.103 4	30.39	2.04%	3.177 6
Proposed method	0.010 3	9.21	0.13%	0.285 1

ϵ 值反映被解缠相位差的波动情况,由表 3 可知,Goldstein 枝切法和质量图法的相位 ϵ 值较大,这是因为枝切法中未能穿过枝切线导致局部相位未被处理,而质量图法解得的质量效果较差,导致与原始包缠相位相比波动较大;本文算法由于对局部相位变化较大的区域进行了针对性处理,波动性较好,就运算时间而言,虽然枝切法的时间最短,但是其建立在部分相位遗漏的基础上,本文算法在经典最小二乘本身方向之外增加两个方向,运算效率降低在所难免,但是效率仍然远高于基于路径规划的质量图相位解缠算法。从不连续点考虑,对于局部相位条纹密度较大,像素分辨率难以满足相位变化率较大时采样定律的区域,枝切法和质量图法解缠质量不理想,因为采用路径积分的相位解缠算法必须满足相位梯度连续才能得到正确的结果,所以不连续点较多;对于平滑性强的算法,不连续点数少可能是相位变化较快的区域完全被平滑掉,所以单从不连续点去评价解缠质量不一定具有真实性,还要结合反缠绕相位均方根值进行评价,从以上四种评价指标看,本文提出的方法均更胜一筹。

4 结论

本文提出了一种基于掩膜滤波和质量图法重新定义权值的加权四向最小二乘迭代法,解决局部存在噪声集中斑块的 InSAR 图像相位解缠问题。对噪声集中斑块的 InSAR 图像先掩膜滤波,有效保留真实相位信息,防止大误差在迭代过程的传播。结合最大相位梯度质量图和相位导数偏差质量图的优点,得到新的更可靠的质量图,用新质量图重新定义权值,较好地抑制了误差在掩膜区域的传递,采用添加了两个对角线方向上的相位梯度信息的四向最小二乘法,提高运算速度,改善最小二乘法的过度平滑作用,从而有效、精确地完成对局部噪声斑块的 InSAR 图像的相位解缠。实验结果表明,该方法比最小二乘迭代的填充方法具有更好的效果,能够较好地完成掩膜区域的解包裹,获得比较精确的解缠相位,解决了 InSAR 图像局部噪声较大导致不可靠数据点较为集中从而难以获得较好的解缠相位这一难题。

参考文献

- [1] ZEBKER H A, ROSEN P. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: the landers earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2002, **99**(B10): 19617-19634.
- [2] LOFFELD O, NIES H, KNEDLIK S, et al. Phase unwrapping for SAR interferometry a data fusion approach by Kalman filtering[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2007, **46**(1): 47-58.
- [3] WEI Z Q, XU F, JIN Y Q. Phase unwrapping for SAR interferometry based on an ant colony optimization algorithm[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, **29**(3): 711-725.
- [4] LAWIN F J, FORSSÉN P E, OVRÉN H. Efficient multi-frequency phase unwrapping using kernel density estimation [C]. *European Conference on Computer Vision*. Springer International Publishing, 2016: 170-185.
- [5] HUNTLEY J M. Three-dimensional noise-immune phase unwrapping algorithm[J]. *Journal of Applied Optics*, 2001, **40**(23): 3901-3908.
- [6] XU Jing-bo, YUAN Yi-bao, CUI Xiao-meng, et al. Rational approximation implementation approach to determine Gaussian filtering mean line in surface roughness measurement[J]. *Journal of Jilin University*, 2014, **44**(5): 1347-1352.
- [7] 许景波,袁怡宝,崔晓萌,等.表面测量中高斯滤波中线的有理逼近实现[J]. *吉林大学学报*, 2014, **44**(5): 1347-1352.
- [7] GENG Guo-wang, ZHANG Hong-min, XU Qing, et al. Multi-band InSAR differential filtering phase unwrapping method[J]. *Acta Geochimica Sinica*, 2012, **41**(03): 434-440+448.
- 靳国旺,张红敏,徐青,等.多波段 InSAR 差分滤波相位解缠方法[J]. *测绘学报*, 2012, **41**(03): 434-440+448.

- [8] GUO Yuan, MAO Qi, CHEN Xiao-tian, *et al.* Study of a fast windowed fourier filtering method for interference fringes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(4): 0612008.
郭媛,毛琦,陈小天,等.干涉条纹快速加窗傅里叶滤波方法的研究[J].光学学报,2014,**34**(4):0612008.
- [9] LI Hong-yu, SONG Hong-jun, WANG Hui. Improved branch cutting method guided by quality map [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2016, **35**(8): 38-41
李泓宇,宋红军,王辉.引入质量图指导的改进的枝切法[J].国外电子测量技术,2016,**35**(8):38-41.
- [10] GUO Yuan, CHEN Xiao-tian, ZHANG Tao, *et al.* Robust phase unwrapping algorithm based on least squares [J]. *Optical and Laser in Engineering*, 2014, **63**: 25-29.
- [11] ZHANG Xiao-xuan, WANG Yue-min, HUANG Shu-jun, *et al.* A two-step phase-shifting algorithm for phase calculation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(3): 0311005.
张晓璇,王月敏,黄淑君,等.一种两步相移相位解算方法[J].光子学报,2017,**46**(3):0311005.
- [12] GUO Yuan, WU Quan, MAO qi, *et al.* Phase retrieval method of single interference fringe pattern based on shearing interferometry [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2015, **26**(10): 1953-1959.
郭媛,吴全,毛琦,等.基于横向剪切的四向最小二乘相位解包裹算法[J].光电子·激光,2015,**26**(10):1953-1959.
- [13] CARBALLO G F, FIEGUTH P W. Probabilistic cost function for networks flow phase unwrapping [J]. *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, 2000, **38**(5): 2192-2201.
- [14] LIU Guo-lin, DU Zhi-xing, XUE Huai-ping, *et al.* Application of kalman filters to noise eliminating and phase unwrapping of InSAR [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2006, **26**(2): 66-70.
刘国林,独知行,薛怀平,等.卡尔曼滤波在 InSAR 噪声消除与相位解缠中的应用[J].大地测量与地球动力学,2006,**26**(2):66-70.
- [15] HOOPER A, ZEBKER H Ar. Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series [J]. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 2007, **24**(9): 2737-2747.
- [16] QIAN Xiao-fan, WANG Zhan-liang, HU Te, *et al.* Reconstruction of light field phase using single digital holography and shear interference principle [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(07): 1821-1826.
钱晓凡,王占亮,胡特,等.用单幅数字全息和剪切干涉原理重构光场相位[J].中国激光,2010,**37**(07):1821-1826.
- [17] GUO Yuan, CHEN Xiao-tian. Study of improved phase unwrapping algorithm based on least squares [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(5): 0508005.
郭媛,陈小天.基于最小二乘相位解包裹改进算法的研究[J].中国激光,2014,**41**(5):0508005.
- [18] LI Qin, LIU Wei, WANG Dao-shi, *et al.* Four-direction shear phase unwrapping algorithm based on second-order mass weight [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2018, **29**(6): 618-626
李芹,刘维,王道档,等.基于二阶质量权的四向剪切相位解包裹算法[J].光电子·激光,2018,**29**(6):618-626.
- [19] WANG Yong, RAO Qin-fei, TANG Jing, *et al.* Phase expansion method using the reciprocal variance quality map of wavelet basis coefficients [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(2): 0210001
王勇,饶勤飞,唐靖,等.采用小波基系数幅值倒数方差质量图的相位展开方法[J].光子学报,2015,**44**(2): 0210001.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 61872204), Heilongjiang Provincial Natural Science Fund (No. F2017029), Chinese Education Department Overseas Returnees' Funds, and Heilongjiang Provincial Education Department Surface Scientific Research Project (No.12521600).

引用格式:GUO Yuan, DU Song-ying. Phase Unwrapping Method of InSAR Interferogram with Local Noise Patch [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(12): 1212001

郭媛,杜松英.局部噪声斑块 InSAR 干涉图相位解缠算法[J].光子学报,2018,**47**(12):1212001