



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
12
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



特征点检测 P1639



第20卷第12期（总第236期）

2015年12月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院
主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文
编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会
邮政信箱 北京9718信箱
邮 编 100101
电子信箱 jig@radi.ac.cn
电 话 010-64807995
网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)
印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

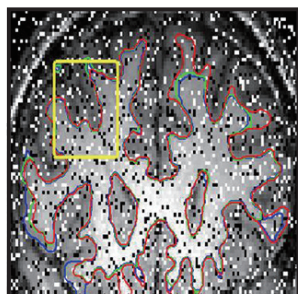
Title inscription: Song Jian Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

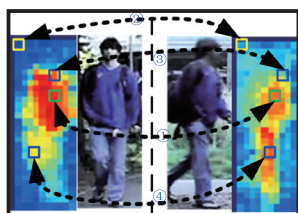
Editor-in-Chief LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics
P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China
Zip code 100101
E-mail jig@radi.ac.cn
Telephone 010-64807995
Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)
Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB
ISSN 1006-8961
CODEN ZTTXFZ
国外发行代号 M1406
国内邮发代号 82-831
国内定价 50.00元



融合全局和局部相关熵的图像分割(第1619页)



多方向显著性权值学习的行人再识别(第1674页)



混合编码差分进化粒子群算法及多示例学习的高光谱影像降维与分类(第1689页)

综述

遥感影像变化检测算法综述

佟国峰, 李勇, 丁伟利, 岳晓阳1561

图像处理和编码

紧框架域混合正则化模型在图像恢复中的应用

李旭超, 马松岩, 边素轩1572

色彩熵在图像质量评价中的应用

徐琳, 陈强, 汪青1583

图像分析和识别

字典学习和稀疏表示的海马子区图像分割

时永刚, 王东青, 刘志文1593

阈值标记的分水岭彩色图像分割

张海涛, 李雅男1602

改进K-means活动轮廓模型

张倩颖, 吴纪桃, 谢晓振, 王晓涛1612

融合全局和局部相关熵的图像分割

黄扬, 郭立君, 张荣1619

递进的迭代脉冲噪声检测

孙劲光, 黄旭1629

对数极坐标系下尺度不变特征点的检测与描述

陶涛, 张云1639

子块鉴别分析的路面裂缝检测

钱彬, 唐振民, 徐威, 陶玉婷1652

多尺度构图先验的显著目标检测

王娇娇, 刘政怡1664

多方向显著性权值学习的行人再识别

陈莹, 霍中花1674

基于最大相关熵准则的2维主成分分析

赵丽美, 贾维敏, 王标标, 于强1684

遥感图像处理

混合编码差分进化粒子群算法及多示例学习的高光谱影像降维与分类

高红民, 李臣明, 王艳, 谢科伟, 陈玲慧, 何振宇1689

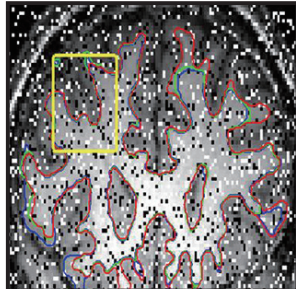
InSAR中应用可靠度导向改进的分级表相位展开算法

宋芳, 李勇, 余涛1699

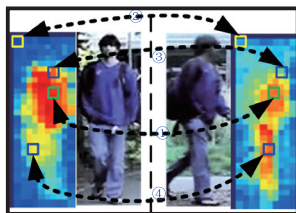
总目次 I

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Integration of global and local correntropy image segmentation algorithm(P1612)



Person re-identification based on multi-directional saliency metric learning(P1674)



Dimension reduction and classification for hyperspectral image based on particle swarm optimization and differential evolution algorithm with hybrid encoding and multiple instance learning(P1689)

Review

Review of remote sensing image change detection

Tong Guofeng, Li Yong, Ding Weili, Yue Xiaoyang 1561

Image Processing and Coding

Applying a hybrid regularization model in a tight frame domain to image restoration

Li Xuchao, Ma Songyan, Bian Suxuan 1572

Application of color entropy to image quality assessment

Xu Lin, Chen Qiang, Wang Qing 1583

Image Analysis and Recognition

Segmentation of hippocampal subfields using dictionary learning and sparse representation

Shi Yonggang, Wang Dongqing, Liu Zhiwen 1593

Watershed algorithm of color image segmentation with threshold mark

Zhang Haitao, Li Yanan 1602

Improved K-means active contours stem

Zhang Qianying, Wu Jitao, Xie Xiaozhen, Wang Xiaotao 1612

Integration of global and local correntropy image segmentation algorithm

Huang Yang, Guo Lijun, Zhang Rong 1619

Progressive iterative impulse noise detection

Sun Jinguang, Huang Xu 1629

Detection and description of scale-invariant keypoints in log-polar space

Tao Tao, Zhang Yun 1639

Pavement crack detection algorithm based on sub-patch discriminant analysis

Qian Bin, Tang Zhenmin, Xu Wei, Tao Yuting 1652

Multi-scale saliency detection based on composition prior

Wang Jiaojiao, Liu Zhengyi 1664

Person re-identification based on multi-directional saliency metric learning

Chen Ying, Huo Zhonghua 1674

Two-dimensional principal component analysis based on maximum correntropy criterion

Zhao Limei, Jia Weimin, Wang Biaobiao, Yu Qiang 1684

Remote Sensing Image Processing

Dimension reduction and classification for hyperspectral image based on particle swarm optimization and differential evolution algorithm with hybrid encoding and multiple instance learning

Gao Hongmin, Li Chenming, Wang Yan, Xie Kewei, Chen Linghui,

He Zhenyu 1689

Reliability-guided phase unwrapping algorithm based on improved classification table for InSAR

Song Fang, Li Yong, Yu Tao 1699

中图法分类号: P237 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)12-1699-06

论文引用格式: Song F, Li Y, Yu T. Reliability-guided phase unwrapping algorithm based on improved classification table for InSAR[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(12): 1699-1704. [宋芳, 李勇, 余涛. InSAR 中应用可靠度导向改进的分级表相位展开算法[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(12): 1699-1704.] [DOI:10.11834/jig.20151215]

InSAR 中应用可靠度导向改进的分级表相位展开算法

宋芳^{1,2}, 李勇³, 余涛¹

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094; 2. 装备学院, 北京 101416;
3. 浙江师范大学信息光学研究所, 金华 321004

摘要: **目的** 在干涉合成孔径雷达的相位展开过程中, 如果相位展开的展开路径穿过残差点就会产生相位展开的误差。在相位展开的时候, 希望将相位展开的误差限制在局部区域, 提高相位展开的精度。 **方法** 首先通过判断截断相位图的残差点, 并以 InSAR 的干涉一致性图作为相位展开的可靠性度量, 对截断相位图进行量化, 将残差处的可靠度设为排序中的最低等级。在进行可靠度排序后进行干涉合成孔径雷达相位图的相位展开。 **结果** 使用该算法改进了经典可靠度导向相位展开算法中可靠度排序的缓慢问题。与经典菱形算法相比, 展开精度高很多。与洪水算法相比, 展开速度能快上百倍。通过可靠度排序的改进, 对于干涉合成孔径雷达相位展开后的结果进行分析, 可以看到提高了相位展开的精度, 有效的控制了相位展开过程中误差的传递。 **结论** 相位展开算法的改进提高了干涉合成孔径雷达相位展开的精度, 在干涉合成孔径雷达的相位展开中可以广泛应用。

关键词: 合成孔径雷达干涉测量; 干涉一致性图; 二维相位展开; 残差

Reliability-guided phase unwrapping algorithm based on improved classification table for InSAR

Song Fang^{1,2}, Li Yong³, Yu Tao¹

1. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. Academy of Equipment, Beijing 101416, China; 3. Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

Abstract: **Objective** In the process of phase unwrapping of InSAR, the error of phase unwrapping can be gained if unwrapping path is on the residual error point. Our objective is limiting the error of phase unwrapping in local region. **Method** The coherence map of InSAR is used as reliability map for phase unwrapping and is quantized with given level. The residues of wrapped phase are found and then their reliability is set to the lowest level. Phase unwrapping is carried out after reliability reordering. **Result** The algorithm using classification table is adopted instead of the slow classical reliability-guided phase unwrapping algorithm. The experiments were carried out to verify the proposed method. The speed of our method is faster than classical reliability-guided algorithm in the experiments. The phase unwrapping results of InSAR show enhanced accuracy, and the error propagations are effectively controlled. **Conclusion** The experimental results prove the proposed method is accurate and applicable for InSAR's phase unwrapping.

Key words: InSAR; reliability map; phase unwrapping; residues

收稿日期: 2014-08-17; 修回日期: 2015-06-16

基金项目: 中国科学院基础研究项目 (Y3SG1100CX)

第一作者简介: 宋芳 (1974—), 女, 2005 年于四川大学获信息光学专业博士学位, 研究方向为航天遥感融合。E-mail: song_fang

@tom.com

0 引言

采用 InSAR 技术可以获得高空间分辨率、高精度的地球表面数字高程模型 (DEM)^[1-2], 该技术通过两幅 SAR 图像干涉处理产生的相位差制作数字高程模型。由于反三角函数运算获得的相位被限制在 $(-\pi, \pi]$ (即截断相位), 需要采用适当的算法将截断的相位展开为连续的相位。因此, 相位展开算法是干涉合成孔径雷达信号处理的关键技术之一。

在没有约束条件时, 相位展开的结果具有不确定性, 存在无限多个的解。为了获得相位展开中的唯一解, 研究者提出相位连续性的假设, 即假设任意两个相邻像素之间的连续相位差小于 π 。然而, 实践中该相位连续性假设并不是总能得到满足, 因此, 相位展开是一个具有挑战性的问题。

经过几十年的广泛研究, 研究者们提出了很多具有实用价值的相位展开算法。如可靠度导向法^[3-6]、Goldstein 的枝切法^[7-9]、Flynn 算法^[10]等。

可靠度导向相位展开算法是相位展开算法其中的重要方法之一。由于存在最大可靠度排序及查找操作, 经典的可靠度导向相位展开算法 (洪水算法) 非常费时。Anand 等人^[11]提出了一种通过逐步设置阈值代替排序的快速洪水算法来实现快速相位展开。在实际操作过程中, 可以通过使用可靠度排序查找表的快速洪水算法来实现相位展开^[12]。

在研究过程中发现, 进行干涉合成孔径雷达截断相位展开^[13-15]时, 如果采用干涉一致性图作为可靠度图, 残差点可靠度并不总是比邻近像素低。如果展开路径穿过残差点就会产生相位展开时的误差。将可靠度排序改进分级表相位展开算法应用于 InSAR 相位展开时, 提高了相位展开的精度, 控制了残差点的误差传递, 证明了该算法在 InSAR 相位展开中应用的有效性。

1 原理

1.1 InSAR 干涉相位图 (interferogram) 和干涉一致性图

设进行相关配准和频移滤波后的图像复振幅为

$$u_1(i, j) = I_1(i, j) \exp[j\varphi_1(i, j)]$$

$$u_2(i, j) = I_2(i, j) \exp[j\varphi_2(i, j)] \quad (1)$$

式中, $\varphi_1(i, j)$ 、 $\varphi_2(i, j)$ 为相位因子, $I_1(i, j)$ 、 $I_2(i, j)$ 为振幅。

则干涉相位图可表示为

$$W(i, j) = u_1(i, j) \times u_2^*(i, j) = I_1(i, j) I_2(i, j) \exp[j(\varphi_1(i, j) - \varphi_2(i, j))] \quad (2)$$

由上式可得干涉条纹图的相位

$$\varphi(i, j) = \arctan \left[\frac{\text{Im}(W(i, j))}{\text{Re}(W(i, j))} \right] \quad (3)$$

式中, $\varphi(i, j)$ 的范围是 $(-\pi, \pi]$ 。

干涉条纹图的连续相位可表示为

$$\varphi_1(i, j) - \varphi_2(i, j) = \varphi(i, j) + 2k\pi \quad (4)$$

式中, k 是整数。

采用相位展开算法得到连续相位。干涉图的质量采用干涉一致性图来衡量。

InSAR 干涉的一致性定义为

$$\hat{\gamma}(i, j) = \frac{\sum_{n, m} u_1(n, m) \cdot u_2^*(n, m) \cdot e^{-j\varphi(n, m)}}{\sqrt{\sum_{n, m} |u_1(n, m)|^2 \sum_{n, m} |u_2(n, m)|^2}} \quad (5)$$

式中, $\varphi(m, n)$ 是与地形有关的相位, (m, n) 是包含 (i, j) 点的窗口中的局域坐标。

通常采用一致性的绝对值作为一致性图, 由干涉一致性图得到相位的可靠度图。

1.2 可靠度排序相位展开原理

采用可靠性图作为指引相位进行路径展开, 如图 1 所示。

图 1 是可靠性图指引下的展开路径, 其中 A 为起始像素, 上 (C) 下 (E) 左 (L) 右 (B) 格点 4 个像素表示已展开像素。假设可靠度满足

$$R_B > R_C > R_D > R_E > R_F > R_H > R_L > R_M > R_N > R_O$$

图 1(a) 表示标记展开像素及队列排序情况。图 1(b) 表示队列中的像素不断排序逐步展开。从图 1 的分析中可以看出, 相位展开的路径是由可靠度高的像素指向可靠度低的像素。

1.3 以可靠度为导向改进的分级算法相位展开

在传统的可靠度排序相位展开算法中, 由于具有对全部像素的排序过程, 所以在运行过程中会有运行速度较慢等弱点。为提高运行速度, 考虑采用可靠度排序改进的分级查找表算法来代替传统的可靠度排序算法进行相位的快速展开^[16]。

	C	Q	G	F	E	P	B	C
	D	R	H	C	D	M	E	X
	O	S	L	A	B	C	R	Z
	N	T	L	E	N	O	J	D
	P	X	Y	Z	W	V	H	J
	Q	I	E	T	U	B	N	O

(a) 初始像素排序展开

	C	Q	G	F	E	P	B	C
	D	R	H	C	D	M	E	X
	O	S	L	A	B	C	R	Z
	N	T	L	E	N	O	J	D
	P	X	Y	Z	W	V	H	J
	Q	I	E	T	U	B	N	O

(b) 排序队列像素展开过程

图1 相位展开过程

Fig. 1 Phase unwrapping

可靠度排序分级查找算法的运行过程是首先将可靠度量化后进行不同等级的分类对比,之后进行相位展开。该方法需要建立一个分级表,该表具有 N 个元素 (N 表示量化级数)。表中的每个元素分别指向对应的存有相同可靠度的像素。该表结构图如图2所示。根据可靠度所属级别的高低,由高向低进行像素的展开。假设像素 D、E、F 的量化等级为 p , 像素 I、J 的量化等级为 m , 而 N 的量化等级为 c , 分别沿着不同的等级进行相位展开。**Max** 用来表示可靠度等级最高的像素。

可靠度排序改进的分级查找算法流程如下:

1) 创建一个分级表, 设定其中每个元素的初始值为零。

2) 展开起始像素周边相邻(上、下、左、右)的4个像素并加入相对应的列表, 让“**Max**”指针指向可靠度最高的像素; 将起始像素的4个相邻像素标记

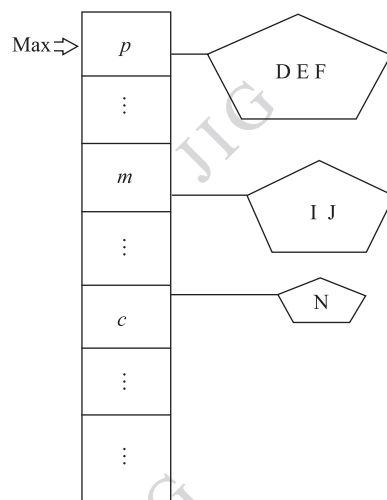


图2 可靠度排序改进分级查找法结构图

Fig. 2 Data structure

为“展开”。

3) 将队列顶部可靠度最高的像素移出。

4) 检查被移出的像素周边相邻的四个像素, 如果其标记为“未展开”, 将其加入到列表中进行展开, 将展开之后的像素标记为“展开”。

5) 调整“**Max**”, 保证指针指向可靠度最高元素, 重复步骤3)与步骤4)。

6) 当 **Max** 指针指向0时, 算法结束。

使用经典算法展开1点的相位需要约 $N/2$ 次比较操作。 N 是队列中的元素的数量。而采用可靠度排序分级查找算法首先进行量化操作, 展开过程中操作的次数较少。当相位图的尺寸比较大时, 该算法的展开速度相比较其他算法可以获得较大的提高。

另一方面, 传统算法没有考虑残差问题, 在实际过程中, 残差的一致性并不总是比它的相邻像素低。在可靠度排序改进的分级查找算法过程中, 首先找出相位图中的残差点; 然后对干涉一致性图进行量化; 最后将残差处的可靠度设定为最低。对可靠度量化的过程改进保证了相位展开的路径不会越过残差处。

2 实验结果

利用实际的干涉合成孔径雷达截断相位图和干涉一致性图数据进行相位展开实验, 在实验中根据通常采用的实验数据大小, 选取的相位图大小为 512×512 像素。主要将可靠度排序改进的分级查

找算法(CA)与经典的菱形算法(DA)进行了比较。

将截断相位图、干涉一致性图、残差点图、DA算法、CA算法图在同一界面程序中整合。图3为干涉合成孔径雷达相位展开实验的第1份数据,为在相位展开界面图中的截断相位图。

图4(a)是第1份数据采用DA算法进行相位展开的结果图,可以看到其中有3块区域相位出现了明显的相位展开错误。而图4(b)是采用CA算法进行展开的相位结果,可以看到没有出现明显错误。

图5分别为第2份数据的截断相位图(a)、干涉一致性图图5(b)。在截断相位图中有1231个残差点。

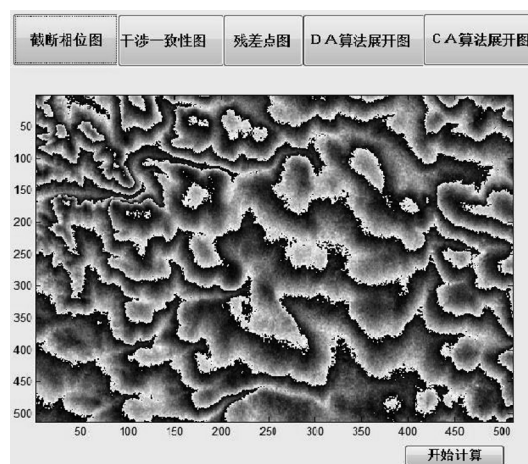
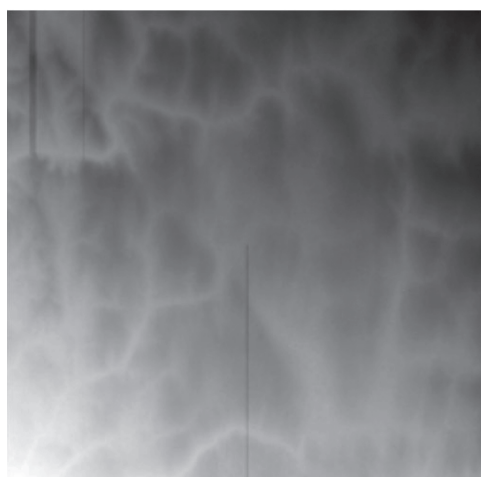


图3 第1份数据

Fig. 3 Data of the first experiment



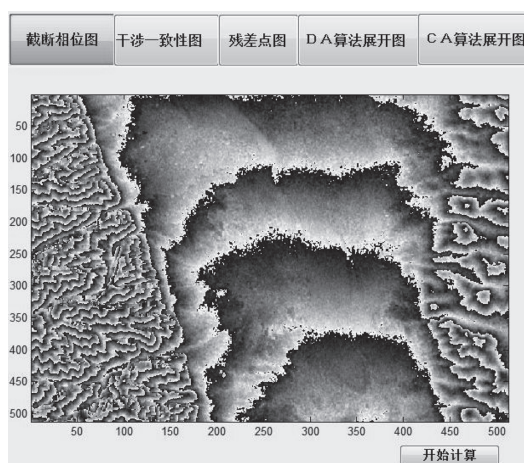
(a) DA算法相位展开图



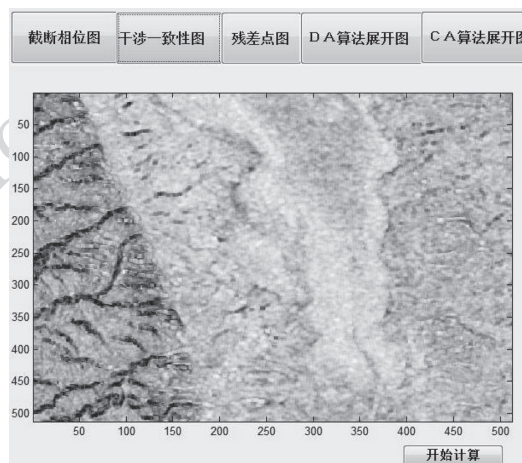
(b) CA算法相位展开图

图4 第1份数据实验结果

Fig. 4 Experimental results of the first experiment



(a) 截断相位图



(b) 干涉一致性图

图5 第2份数据

Fig. 5 Data of the second experiment

图6(a)(b)(c)分别为第2份数据的残差点图、枝切图和相位展开图。从图6(c)中可以看出,采用DA算法进行相位展开时存在着比较多的错误,这是由于在进行相位展开的过程中没有控制误差传递所产生的错误。从图6(d)中可以看出,在CA算法下进行相位展开时,得到了良好的相位展开结果,减少了相位展开的误差。

从两种算法在 InSAR 相位展开应用中的比较可以看出,虽然 DA 算法的执行时间相对较短,但相较 CA 算法的相位展开精度却有所下降。从多种相位展开算法在干涉合成孔径雷达相位展开中的应用进行比较可以得出,相位展开算法^[16]在干涉合成孔径雷达中也获得了良好的应用,取得了良好的实验结果。

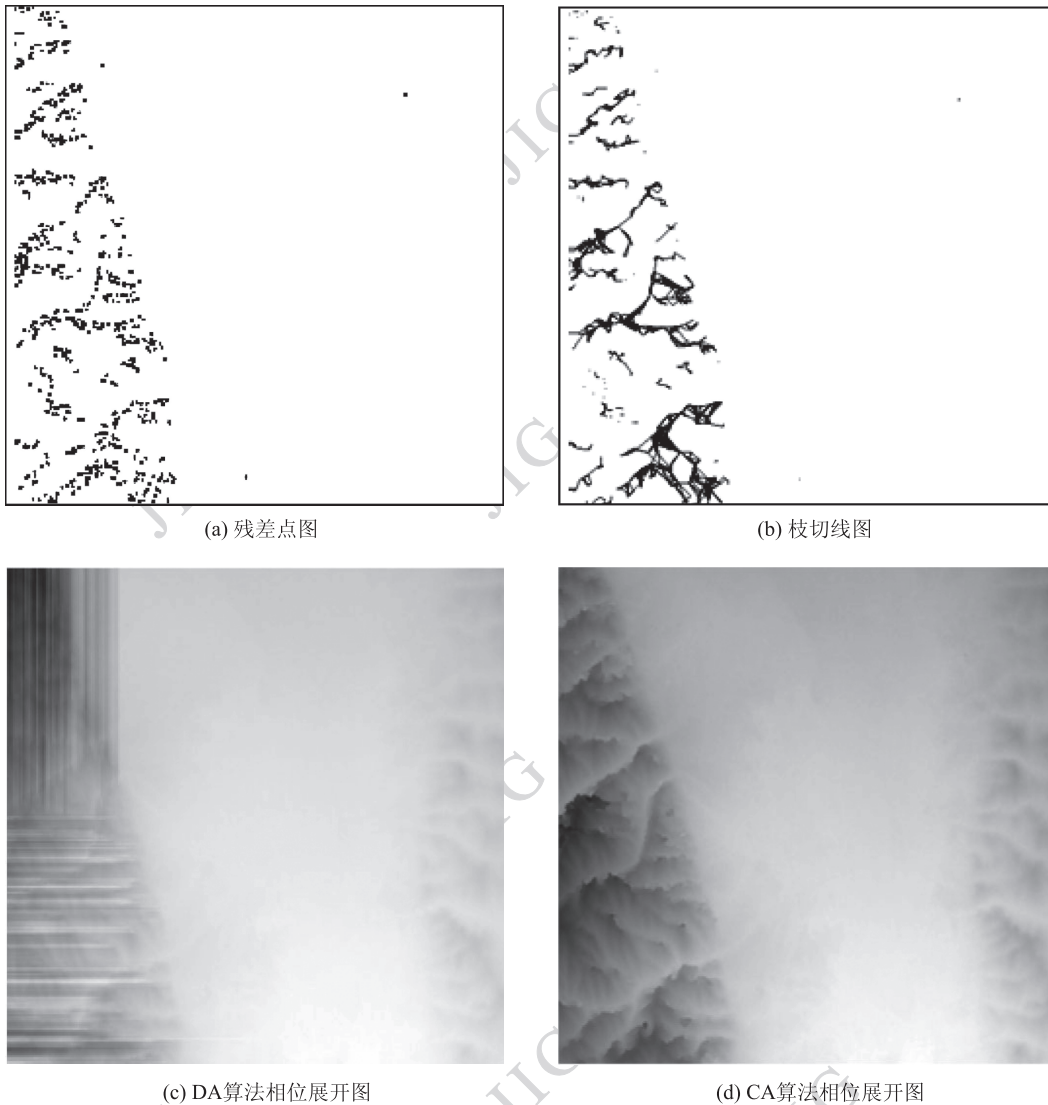


图6 第2份数据实验结果

Fig. 6 Experimental results of the second experiment

3 结论

相位展开是干涉合成孔径雷达信号处理中的一个重要步骤。采用可靠度导向的相位展开算法能够将相位展开的错误限制在局部区域。在可靠度排序

改进的分级查找算法中,对残差点的可靠度进行了分级查找,重新确定了等级进行量化,加快了相位展开速度。在 InSAR 相位展开中使用可靠度排序改进的分级查找算法,证明了该方法在 InSAR 相位展开中的良好应用价值。在未来的研究中希望通过对算法排序方式的进一步改进,更好地加快相位展开速度。

参考文献 (References)

- [1] Bamler R, Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry [J]. Inverse Problems, 1998, 14(4): R1-R54.
- [2] Zebker H A, Hensley S, Shanker P, et al. Geodetically accurate InSAR data processor [J]. IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens., 2010, 48(12): 4309-4321.
- [3] Su X Y, Chen W J. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review [J]. Opt. Lasers Eng. 2004, 42: 245-261.
- [4] Liu S, Xiao W, Pan F, et al. Complex-amplitude-based phase unwrapping method for digital holographic microscopy [J]. Optics and lasers in engineering, 2012, 50: 322-327.
- [5] Zhao M, Huang L, Zhang Q, et al. Quality-guided phase unwrapping technique: comparison of quality maps and guiding strategies [J]. Appl. Opt., 2011, 50: 6214-6224.
- [6] Fang S, Meng L, Wang L J, et al. Quality-guided phase unwrapping algorithm based on reliability evaluation [J]. Appl. Opt., 2011, 50: 5446-5452.
- [7] Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping [J]. Radio Science, 1988: 713-720.
- [8] Zhang Y, Feng D Z, Qu X N, et al. Application of a Novel Branch-Cut Algorithm in Phase Unwrapping [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2013, 42(4): 555-558. [张妍, 冯大政, 曲小宁, 等. 改进的枝切法在相位展开中的应用 [J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(4): 555-558.]
- [9] Lu Y G, Wang X Z, He G T, et al. Phase unwrapping based on branch cut placing and reliability ordering [J]. Optical Engineering, 2005, 44(5): 055601(1-9).
- [10] Flynn T J. Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1997, 14(10): 2692-2701.
- [11] Anand A, Zhou W S. Fast phase-unwrapping algorithm based on a gray-scale mask and flood fill [J]. Appl. Opt., 1998, 37(23): 5416-5420.
- [12] Li Y, Su X. Fast algorithm for reliability-guided phase unwrapping [J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(11): 76-79.
- [13] 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.
- [14] Gens R. Two-dimensional phase unwrapping for radar interferometry: Developments and new challenges [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24: 703-710.
- [15] Gens R, Van Genderen J L. SAR Interferometry-Issues, Techniques, applications [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17: 1803-1835.
- [16] Li Y, Mao L, Zhang H J, et al. Fast phase unwrapping based on nonlinear look-up table in digital holographic microscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209025(1-6). [李勇, 毛磊, 章海军, 等. 数字全息显微镜中采用非线性查找表的相位快速展开 [J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209025(1-6).]