



引文格式:胡灿程,汪长城,沈鹏.一种引入极化似然比检验的极化SAR滑坡形变监测方法[J].武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(12):1943-1950.DOI:10.13203/j.whugis20200281

Citation: HU Canc Cheng, WANG Changcheng, SHEN Peng. A New Landslide Deformation Monitoring Method with Polarimetric SAR Based on Polarimetric Likelihood Ratio Test[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(12): 1943-1950. DOI:10.13203/j.whugis20200281

一种引入极化似然比检验的极化SAR滑坡形变监测方法

胡灿程^{1,2} 汪长城¹ 沈鹏¹

1 中南大学地球科学与信息物理学院,湖南长沙,410083

2 广州市城市规划勘测设计研究院,广东广州,510000

摘要:相较于传统的单极化合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR),全极化SAR(polarimetric SAR, PolSAR)能够获取更加丰富的地物目标极化散射信息,更全面地描述目标的几何物理特征。为了充分利用地物目标的极化散射信息,基于复 Wishart 分布的极化似然比检验(polarimetric likelihood ratio test, PolLRT)原理,构建了极化似然比统计量来准确评价主、从影像块之间的相似性。与传统的极化SAR偏移量跟踪方法相比,所提方法不仅考虑了同种极化方式间的互相关信息,而且考虑了不同极化方式间的互相关信息,提高了极化信息匹配性能。通过覆盖美国科罗拉多州 Slumgullion 滑坡的全极化无人机SAR(unmanned aerial vehicle SAR, UAV SAR)数据来开展实验,结果表明,所提方法具有更高的形变估算精度,并且在不同匹配窗口参数下表现出更加稳健的形变估算性能。

关键词:形变监测; PolLRT; PolSAR

中图分类号: P237

文献标识码: A

收稿日期: 2020-10-25

DOI: 10.13203/j.whugis20200281

文章编号: 1671-8860(2023)12-1943-08

A New Landslide Deformation Monitoring Method with Polarimetric SAR Based on Polarimetric Likelihood Ratio Test

HU Canc Cheng^{1,2} WANG Changcheng¹ SHEN Peng¹

1 School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

2 Guangzhou Urban Planning and Design Survey Research Institute, Guangzhou 510000, China

Abstract: Objectives: Compared with the traditional single-polarization synthetic aperture radar(SAR), the full-polarization SAR can obtain more abundant polarimetric scattering information and describe the geometric and physical characteristics of the target more comprehensively. **Methods:** To make full use of the polarimetric scattering information of ground objects, we utilize the polarimetric coherence matrix used to describe distributed targets and the polarimetric likelihood ratio test (PolLRT) based on complex Wishart distribution to accurately evaluate the temporal similarity between master and slave image blocks. **Results:** Compared with the traditional method, this method not only considers the cross-correlation information between the same polarization, but also considers the cross-correlation information between different polarization modes, to improve the matching performance of the time series polarization information. In the real experiment, two fully polarized unmanned aerial vehicle(UAV) SAR data are used as experimental data, and the external global positioning system (GPS) deformation data is used as the reference data. **Conclusions:** The experimental results show that the proposed algorithm has higher deformation extraction accuracy and shows more robust deformation extraction performance under different matching window sizes.

基金项目:国家自然科学基金(41671356)。

第一作者:胡灿程,硕士,主要研究方向为极化SAR滑坡形变监测。hucancheng@csu.edu.cn

通讯作者:汪长城,博士,教授。wangchangcheng@csu.edu.cn

Key words: deformation monitoring; PolLRT; PolSAR

滑坡是中国常见的一种自然地质灾害,由于其突发性,极易造成人民生命财产的巨大损失。滑坡形变监测是滑坡灾害预警的基础,对于滑坡灾害防治具有重要意义^[1-2]。相比于传统人工测量、位移计、测斜仪、裂缝计及全球定位系统(global positioning system, GPS)测量等传统手段,合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)作为一种主动式遥感技术,具备全天时、全天候、大范围与非接触式测量的优点,已被广泛地应用于滑坡形变监测^[3-4]。基于SAR的滑坡形变监测方法主要包含差分干涉SAR(differential interferometric SAR, D-InSAR)和像素偏移量跟踪方法(pixel offset tracking, POT)等^[5-6]。相对于仅能估算微小的一维形变的D-InSAR方法而言,最早由文献[7-8]提出来的POT有着其独特的形变监测优势,一方面具备对较大滑移量的滑坡体监测能力,另一方面能够同时获取方位向和距离向的二维形变量。

国内外学者主要是针对单极化SAR影像的强度信息进行POT研究^[9-12],目前单极化SAR POT主要可分为3种:(1)归一化互相关系数法(normalized cross-correlation, NCC)^[1, 13-15];(2)基于傅里叶变换的相位相关方法(phase correlation using Fourier transform, PC)^[16];(3)最大似然纹理方法(maximum likelihood texture tracking, ML)^[17]。然而这些单极化SAR方法不完全适用于全极化SAR影像,因为它们未充分利用地物极化散射信息,无法得到精度更高的形变监测结果。近年来,随着极化SAR系统的不断发展与完善,全极化SAR数据不断增多,全极化SAR影像能够提供丰富的地物散射信息,POT有可能实现更高精度、更加稳健的形变监测。在利用全极化SAR数据的极化散射信息进行形变估算方面,文献[18]提出了一种全极化SAR POT——归一化内积(polarimetric normalized inner product, PolNIP)方法,该方法基于Pauli基散射矢量构建了主、从影像的归一化矢量内积来描述相似度,从而提高POT的精度和稳健性。该方法虽然相较于传统单极化SAR POT的精度和稳健性有所提高,但是该方法仅考虑了同种极化方式间的互相关信息,并未考虑不同极化方式间的互相关信息,因此其未充分发挥极化SAR数据中丰富的地物散射信息提高形变估算精度和稳健性的潜力。

针对上述极化SAR POT中存在的问题,为

了充分将地物目标的极化散射信息用于形变估算,本文基于复Wishart分布的极化似然比检验(polarimetric likelihood ratio test, PolLRT),采用极化相干矩阵来描述分布式目标,提出一种基于PolLRT的极化SAR POT(简称为PolLRT方法)来精准地提取形变^[13]。相较于PolNIP方法,PolLRT方法不仅考虑了同种极化方式间的互相关信息,而且考虑了不同极化方式间的互相关信息,充分利用了全极化SAR数据的极化散射信息。在形变估算性能验证实验中,本文以覆盖美国科罗拉多州的Slumgullion滑坡的两景全极化无人机SAR(unmanned aerial vehicle SAR, UAV SAR)数据作为实验数据,从形变估算精度及不同匹配窗口下的形变估算稳健性两个方面,对本文方法的形变估算性能进行验证分析。实验结果表明,与PolNIP方法相比,PolLRT方法具有更高的形变提取精度,并且在不同匹配窗口参数下表现出更加稳健的形变提取性能。

1 研究方法

为了充分利用全极化SAR数据的强度和地物目标极化散射信息,本节分析了复相干矩阵统计特性与似然比检验原理,然后详细介绍了本文提出的PolLRT方法的滑坡形变监测方法及流程。

1.1 复相干矩阵统计特性与似然比检验原理

对于全极化SAR影像,可用散射矩阵 X 来描述地物目标所包含的极化散射信息:

$$X = \begin{bmatrix} X_{HH} & X_{HV} \\ X_{VH} & X_{VV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, X_{HH} 、 X_{VV} 为同极化分量; X_{HV} 、 X_{VH} 为交叉极化分量。为了表示方便,将散射矩阵 X 转换为Pauli基散射矢量 k_{Pauli} ,在单站雷达情况下,其满足互易对称性,即 $X_{HV} = X_{VH}$ 。

$$k_{\text{Pauli}} = \frac{1}{\sqrt{2}} [X_{HH} + X_{VV} \quad X_{HV} - X_{VH}]^T \quad (2)$$

将其转化为极化相干矩阵 T ^[19],用于表示分布式散射目标:

$$T = k_{\text{Pauli}} k_{\text{Pauli}}^{*T} \quad (3)$$

式中, k_{Pauli}^* 表示 k_{Pauli} 的共轭矩阵。由于单视复数SAR影像得到的极化相干矩阵是非满秩的,为了保持原始全极化SAR影像的空间分辨率和不降低形变提取的精度,本文通过调整非对角元素来

强制极化相干矩阵为满秩矩阵^[20-21]。因此,强制极化相干矩阵 T 为满秩矩阵 T' 可表达为:

$$T'_{i,j} = \begin{cases} T_{i,j}, & i=j \\ rT_{i,j}, & i \neq j \end{cases} \quad (4)$$

式中, $T_{i,j}$ 、 $T'_{i,j}$ 分别表示原始相干矩阵及变换后相干矩阵 i 行、 j 列的元素; $r = \sqrt[3]{\min(n/q, 1)}$, n 为等效视数, q 为矩阵 T 的维数, 全极化影像的 q 为 3。强制相干矩阵满秩后, 可认为相应数据的等效视数为 3, 即等于矩阵维度。令 $R = nT$, 矩阵 R 服从复 Wishart 分布, 即 $R \in W(q, n, \Sigma)$, $\Sigma = E(T)$ 为多视协方差矩阵的空间统计平均, 则其概率密度函数 $\rho_T^{(q, n, \Sigma)}(R)$ ^[14, 22] 可表示为:

$$\rho_T^{(q, n, \Sigma)}(R) = \frac{|R|^{n-q} \exp[-\text{tr}(\Sigma^{-1}R)]}{K(n, q) |\Sigma|^n} \quad (5)$$

$$K(n, q) = \pi^{\frac{q(q-1)}{2}} \prod_{j=1}^q \Gamma(n-j+1) \quad (6)$$

式中, $\Gamma(\cdot)$ 表示 Gamma 函数。复 Wishart 矩阵相似性检验方法可见文献[23]。假定主影像 M 和从影像 S 是相互独立的, 并且都服从复 Wishart 分布, 即:

$$\begin{cases} M \in W(q, n, \Sigma_M), \Sigma_M = \frac{1}{n} M \\ S \in W(q, m, \Sigma_S), \Sigma_S = \frac{1}{m} S \end{cases} \quad (7)$$

式中, m 和 n 是独立样本数。

对于零假设 $H_0: \Sigma_M = \Sigma_S$, 两个矩阵相等, 备选假设: $H_1: \Sigma_M \neq \Sigma_S$ 。如果 H_0 为真, 则 $M + S \in W(q, n+m, \Sigma)$ 和 $\hat{\Sigma} = \frac{1}{n+m} (M + S)$ 。于是, 似然比检验统计量 Q 可以表示为:

$$Q = \frac{\rho_T^{(q, n+m, \hat{\Sigma})}(M+S)}{\rho_T^{(q, n, \hat{\Sigma})}(M) \rho_T^{(q, m, \hat{\Sigma})}(S)} = \frac{(n+m)^{q(n+m)} |M|^n |S|^m}{n^q m^q |M+S|^{n+m}} \quad (8)$$

一般情况下, 矩阵 M 和 S 的视数是相等的, 即 $m = n$ 。由于 $|M|$ 、 $|S|$ 、 Q 都为正数, 所以两边同时取对数得:

$$\ln Q = n(2q \ln 2 + \ln |M| + \ln |S| - 2 \ln |M+S|) \quad (9)$$

由式(9)可知, 当 $\ln Q = 0$ 时, 两个极化相干矩阵是相同的; 两者不同时, $\ln Q < 0$ 。 $\ln Q$ 越接近 0, 则两个极化相干矩阵越相似。

1.2 基于 PoLLRT 的滑坡形变监测方法

POT 的核心就在于如何估算主、从影像匹配

块的相似性, 其相似性估算得越准确, 则主、从影像间偏移量估算的精度就越高。为了得到极化 SAR 主、从匹配块的相似性, 可认为主、从影像块中各个元素对应的极化相干矩阵均是独立服从复 Wishart 分布, 且是相互独立的^[13, 19, 21-22, 24], 其联合概率分布等于块内各个相干矩阵概率分布的乘积。因此, 通过比较匹配块内对应像元的似然比检验相似性, 便可得到主、从匹配块的似然比检验相似性, 则主、从匹配块的似然比统计量 H 可以表示为:

$$H = \frac{\prod_{i \in W} \rho_T^{(q, n+m, \hat{\Sigma}_i)}(M_i + S_i)}{\prod_{i \in W} \rho_T^{(q, n, \hat{\Sigma}_i)}(M_i) \prod_{i \in W} \rho_T^{(q, m, \hat{\Sigma}_i)}(S_i)} = \prod_{i \in W} Q_i \quad (10)$$

式中, W 是匹配窗口内的像元集; i 为像元的序号; Q_i 为像元对应的似然比检验统计量; S_i 为从影像对应像元的极化相干矩阵; M_i 为主影像对应像元的极化相干矩阵; $\hat{\Sigma}_i$ 为多视协方差矩阵的空间统计平均; T 为极化相干矩阵。在 $n = m$ 的典型情况时, 可以对式(10)取对数得到:

$$\begin{aligned} \ln H &= \sum_{i \in W} \ln Q_i = \\ &= \sum_{i \in W} n(2q \ln 2 + \ln |M_i| + \ln |S_i| - 2 \ln |M_i + S_i|) \end{aligned} \quad (11)$$

同样地, 当这两个匹配块相同时, $\ln H = 0$; 反之, $\ln H < 0$ 。因此, 当 $\ln H$ 越接近于 0, 两个块就越相似。因此, 根据两个匹配块的 PoLLRT 相似度定义, 可通过获取主、从影像块的最大相似度, 从而实现极化信息的最佳匹配。

基于上述理论分析, 本文定义矩阵 $M = [M_1 \ M_2 \ \dots \ M_k]$ 和 $S^{i,j} = [S_1^{i,j} \ S_2^{i,j} \ \dots \ S_k^{i,j}]$ 分别代表着主、从全极化 SAR 影像匹配块。而相应匹配块均包含着 k 个像素相应的极化相干矩阵^[13]。 i, j 是从影像中匹配块对应的位置序号。因此, 基于 PoLLRT 的两个块间的偏移量 $F_{i,j}$ 可为^[13]:

$$F_{i,j} = \arg \max_{i,j} \ln H_{i,j} \quad (12)$$

式中, $H_{i,j}$ 表示位于 (i, j) 的像元对应的似然比统计量, 通过对相关平面峰值周围进行插值来获得亚像素偏移量。本文方法的完整流程如图 1 所示。

2 形变估算的精度和稳健性对比

为了验证本文方法的形变估算性能, 本文选

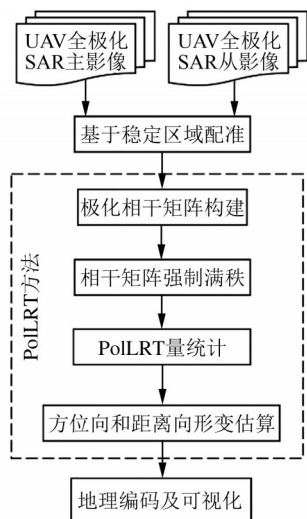


图1 本文方法的流程图

Fig. 1 Flowchart of the Proposed Method

取2011-08-19和2012-05-09的两景L波段全极化UAV SAR影像作为实验数据,该数据覆盖了位于美国科罗拉多州的Slumgullion滑坡。之所以选择该滑坡作为研究区域,是因为对该滑坡的各个方面都已有大量深入的研究与分析^[19, 25-26],因此,选取该滑坡作为研究区域,是POT形变估算性能验证的不二选择。实验采用的UAV SAR数据方位向采样间隔为0.6 m,距离向采样间隔为1.67 m。同时,本文采用与实验数据获取时间相对应的精准GPS数据作为本文精度验证的外部参考数据,并从形变提取精度以及不同匹配窗口的形变估算稳健性效果两个方面,对实验结果进行分析与讨论。图2为由研究区域的全极化UAV SAR影像得到的PauliRGB影像及GPS控制点的位置分布图。图3所示为本文方法在匹配窗口大小为 161×53 像素时,估算的方位向形变、距离向形变。

2.1 形变估算精度评估

为了准确地评估PolLRT和PolNIP两种方法的形变估算精度,本文获取了覆盖研究区域并与采集时间相对应的20个GPS控制点数据用于滑坡形变精度验证。这些GPS控制点的位置分布如图2所示。为了方便对比GPS数据和两种极化SAR POT的形变结果,本文将GPS数据的坐标系转换到SAR坐标系下,以统一这三种方法的坐标系。如图4所示,将在 129×49 像素匹配窗口估算下的PolLRT和PolNIP两种方法得到的合形变结果均与GPS得到的合形变结果进行对比,此处的合形变指的是方位向形变矢量和距离向形变矢量合成的总形变。

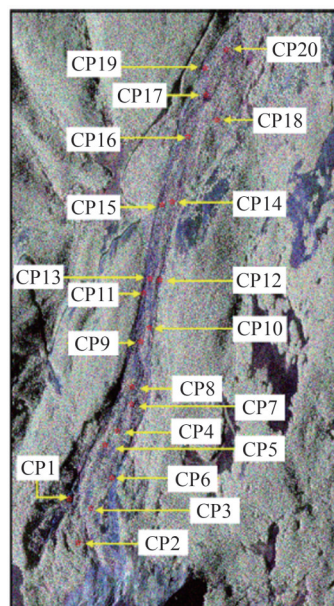
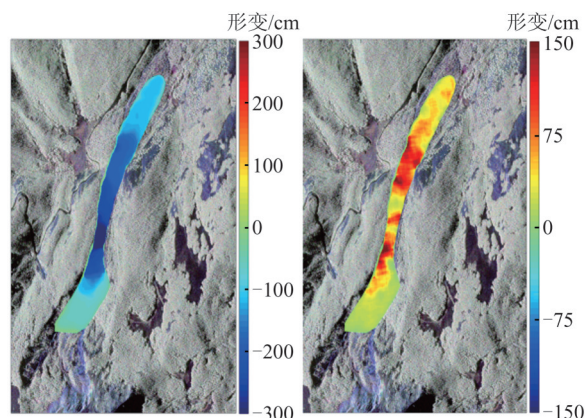


图2 研究区域的全极化UAV SAR影像及GPS控制点位置

Fig. 2 UAV SAR Data of the Study Area and Locations of GPS Points

图3 本文方法在匹配窗口大小为 161×53 像素时得到的方位向形变与距离向形变Fig. 3 Azimuth Displacement, Range Displacement Estimated by the Proposed Method Under Matching Window of 161×53 Pixel

从图4中可以看出,相较于PolNIP方法得到的形变结果,从整体趋势而言,PolLRT方法得到的20个控制点形变结果和GPS得到的形变结果更为一致。具体分析3种方法得到的每个控制点的形变结果可知,其中控制点CP10、CP11、CP12,虽然PolLRT方法得到的形变结果比PolNIP方法得到的形变结果更加接近GPS得到的形变结果,但是两种方法得到的形变结果仍与GPS得到的形变有一定差距。由图2可知,这3个点都处于滑坡边缘区域,因此,在这种情况下规则匹配窗口内包含两种运动特性的像元:稳定像元和形变像元。所以在对边缘区域的形变进行估算时,

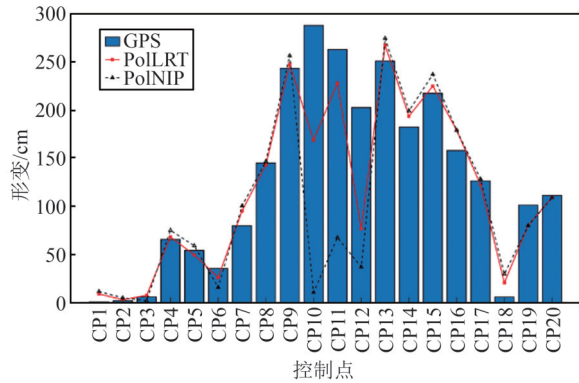


图4 PolLRT方法、PolNIP方法以及GPS得到的形变结果对比

Fig. 4 Displacements Estimated by the PolLRT Method, PolNIP Method and GPS, Respectively

PolLRT方法和PolNIP方法都存在一定程度的误匹配,从而导致两种方法在这3个控制点得到的形变都与GPS得到的形变有较大差距。然而值得注意的是,PolLRT方法在CP11控制点得到的形变与GPS得到的形变的差异并不大,但PolNIP方法在CP11控制点得到的形变的差异却存在较大差异。这是因为PolNIP方法仅考虑了同种极化方式间的互相关信息。而PolLRT方法不仅考虑了同种极化方式间的互相关信息,而且考虑了不同极化方式间的互相关信息。此外,如图5所示,对这些控制点进行统计分析可知,PolLRT方法和PolNIP方法的均方根误差(root mean square error, RMSE)分别为40.743 5 cm和85.397 5 cm, RMSE越小,说明其与GPS结果越一致,精度越高。换言之,相对于PolNIP方法,PolLRT方法形变估算的精度更高,因此在形变估算精度方面,PolLRT方法也是优于PolNIP方法的。

2.2 不同匹配窗口下的形变估算稳健性

为了验证本文方法的形变估算稳健性,采用3个大小依次增加(65×25像素、129×49像素、161×53像素)的匹配窗口来进行形变估算,分析其在不同匹配窗口下得到的形变结果估算情况。一般而言,形变估算结果中稳定区域包含的噪点越少,其形变估算效果越合理,这是因为稳定区域是相对稳定不动的,即形变为0,而噪点一般为异常值,形变不为0。因此,在稳定区域的形变结果中,噪点越多,说明该方法错误估算的情况就越多,误匹配率就越高,形变结果就越不合理。图6和图7分别为PolLRT和PolNIP两种方法得到的方位向和距离向形变。从图6、7中可以看出,在3个不同的匹配窗口中,无论是方位向还是

距离向的形变结果,PolLRT方法相较于PolNIP方法,形变估算结果稳定区域的噪点都更少,一定程度反映了PolLRT方法比PolNIP方法的形变估算错误率更低。将滑坡中部进行放大,图8和图9分别为PolLRT方法和PolNIP方法得到的方位向和距离向形变结果中部放大图。从图8、图9中可以看出,随着匹配窗口的增大,两种方法的形变结果噪点都在减少;然后从同一方法在不同匹配窗口大小的形变结果一致性的角度来分析,3个不同匹配窗口大小下的PolLRT方法得到的滑坡形变区域的形变结果比PolNIP方法也更为一致,滑坡边缘细节也更为清晰与自然。所以在形变估算稳健性方面,PolLRT方法也是优于PolNIP方法的。

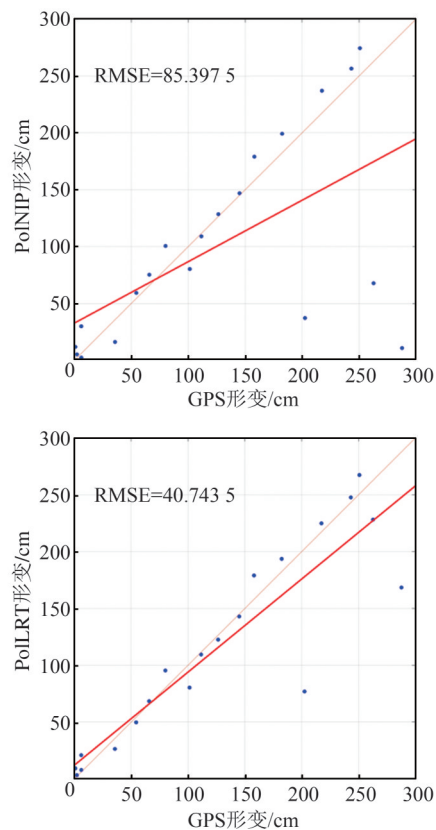


图5 PolNIP方法和PolLRT方法相对于GPS形变结果的散点图及其RMSE

Fig. 5 Scatter Diagrams and the Corresponding RMSE of PolLRT Method and PolNIP Method to GPS, Respectively

3 结 语

本文充分利用全极化SAR影像的强度信息和散射信息,提出了一种基于PolLRT的极化SAR滑坡形变估算方法。该方法不仅考虑了同种极化方式间的互相关信息,而且考虑了不同极化方式间的互相关信息,从而提高了POT在采用

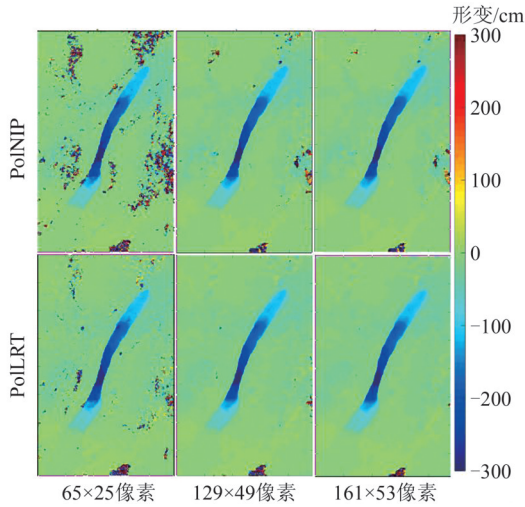


图6 PolNIP方法和PolLRT方法在不同匹配窗口(65×25像素、129×49像素、161×53像素)的方位向形变
Fig. 6 Azimuth Displacements of PolNIP Method and PolLRT Method Under Different Sizes of Matching Window (65×25 Pixel, 129×49 Pixel, 161×53 Pixel)

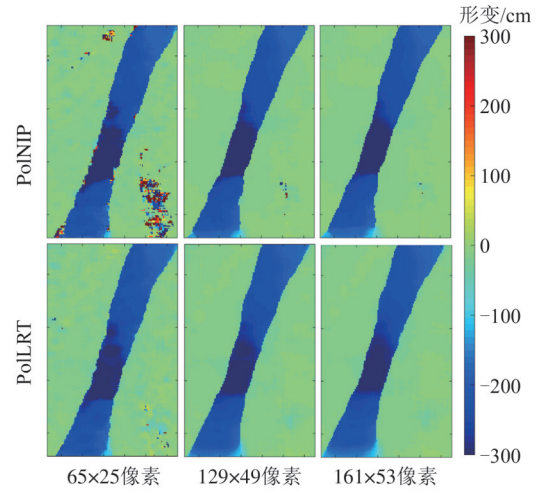


图8 PolNIP方法和PolLRT方法在不同匹配窗口(65×25像素、129×49像素、161×53像素)的方位向形变中部放大图
Fig. 8 Enlarged Drawing of the Middle Part of Azimuth Displacements of PolNIP Method and PolLRT Method Under Different Sizes of Matching Window (65×25 Pixel, 129×49 Pixel, 161×53 Pixel)

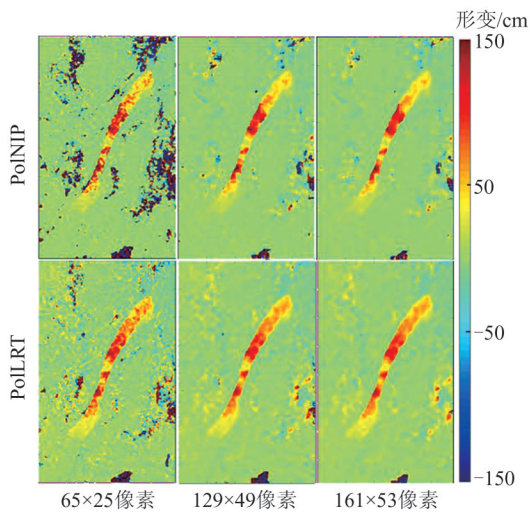


图7 PolNIP方法和PolLRT方法在不同匹配窗口(65×25像素、129×49像素、161×53像素)的距离向形变
Fig. 7 Range Displacements of PolNIP Method and PolLRT Method Under Different Sizes of Matching Window (65×25 Pixel, 129×49 Pixel, 161×53 Pixel)

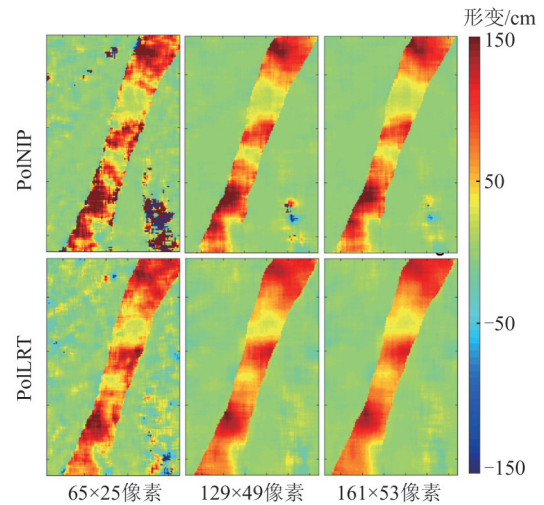


图9 PolNIP方法和PolLRT方法在不同匹配窗口(65×25像素、129×49像素、161×53像素)的距离向形变中部放大图
Fig. 9 Enlarged Drawing of the Middle Part of Range Displacements of PolNIP Method and PolLRT Method Under Different Sizes of Matching Window (65×25 Pixel, 129×49 Pixel, 161×53 Pixel)

极化SAR影像进行形变估算的精度和稳健性。本文选取了两景覆盖美国科罗拉多州的Slumgullion滑坡的全极化UAV SAR影像进行实验。为了验证PolLRT方法的形变估算性能,本文从形变估算精度和不同匹配窗口大小下的形变估算稳健性两个方面对PolLRT方法进行分析与讨论。在形变估算精度方面,以GPS数据作为外部参考,PolLRT方法和PolNIP方法的RMSE分别是40.743 5 cm、85.397 5 cm,可以看出,PolLRT方法具备更高的形变监测精度。在不同窗口匹配下形变估算稳健性

方面,PolLRT方法相对于PolNIP方法,3个不同匹配窗口的形变估算结果包含的噪点更少,且形变结果更为一致,表现出更加稳健的形变估算性能。这是因为PolLRT方法可以充分利用极化散射信息,稳健地估算形变。所以本文提出的基于PolLRT方法的全极化SAR POT无论是稳定区域还是形变区域,都保持了良好的形变估算效果。

参 考 文 献

- [1] van Westen C J, van Asch T W J, Soeters R. Landslide Hazard and Risk Zonation: Why Is It Still so Difficult? [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2006, 65(2): 167-184.
- [2] Huang Runqiu. Large-Scale Landslides and Their Sliding Mechanisms in China Since the 20th Century [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 433-454. (黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.)
- [3] Dai Keren, Zhuo Guanchen, Xu Qiang, et al. Tracing the Pre-failure Two-Dimensional Surface Displacements of Nanyu Landslide, Gansu Province with Radar Interferometry [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(12): 1778-1786. (戴可人, 卓冠晨, 许强, 等. 雷达干涉测量对甘肃南峪乡滑坡灾前二维形变追溯[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(12): 1778-1786.)
- [4] Shi Xuguo, Zhang Lu, Xu Qiang, et al. Monitoring Slope Displacements of Loess Terrace Using Time Series InSAR Analysis Technique [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1027-1034. (史绪国, 张路, 许强, 等. 黄土台塬滑坡变形的时序 InSAR 监测分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 1027-1034.)
- [5] Harant O, Bombrun L, Vasile G, et al. Displacement Estimation by Maximum-Likelihood Texture Tracking [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2011, 5(3): 398-407.
- [6] Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(B7): 9183.
- [7] Michel R, Avouac J P, Taboury J. Measuring Ground Displacements from SAR Amplitude Images: Application to the Landers Earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(7): 875-878.
- [8] Michel R, Avouac J P, Taboury J. Measuring near Field Coseismic Displacements from SAR Images: Application to the Landers Earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(19): 3017-3020.
- [9] Zhang L, Liao M S, Balz T, et al. Monitoring Landslide Activities in the Three Gorges Area with Multi-frequency Satellite SAR Data Sets [M]// Scaioni M. *Modern Technologies for Landslide Monitoring and Prediction*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015.
- [10] Li Jia, Li Zhiwei, Wang Changcheng, et al. Using SAR Offset-Tracking Approach to Estimate Surface Motion of the South Inylchek Glacier in Tianshan [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4): 1226-1236. (李佳, 李志伟, 汪长城, 等. SAR 偏移量跟踪技术估计天山南依内里切克冰川运动[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1226-1236.)
- [11] Hu J, Li Z W, Ding X L, et al. Two-Dimensional Co-seismic Surface Displacements Field of the Chi-Chi Earthquake Inferred from SAR Image Matching [J]. *Sensors*, 2008, 8(10): 6484-6495.
- [12] Cai J H, Wang C C, Mao X K, et al. An Adaptive Offset Tracking Method with SAR Images for Landslide Displacement Monitoring [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9: 830.
- [13] Wang C C, Shen P, Li X F, et al. A Novel Vessel Velocity Estimation Method Using Dual-Platform TerraSAR-X and TanDEM-X Full Polarimetric SAR Data in Pursuit Monostatic Mode [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(8): 6130-6144.
- [14] Lee J S, Hoppel K W, Mango S A, et al. Intensity and Phase Statistics of Multilook Polarimetric and Interferometric SAR Imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(5): 1017-1028.
- [15] Korosov A, Rampal P. A Combination of Feature Tracking and Pattern Matching with Optimal Parameterization for Sea Ice Drift Retrieval from SAR Data [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 258.
- [16] Tong X H, Ye Z, Xu Y S, et al. A Novel Subpixel Phase Correlation Method Using Singular Value Decomposition and Unified Random Sample Consensus [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(8): 4143-4156.
- [17] Erten E, Reigber A, Hellwich O, et al. Glacier Velocity Monitoring by Maximum Likelihood Texture Tracking [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(2): 394-405.
- [18] Wang C C, Mao X K, Wang Q J. Landslide Displacement Monitoring by a Fully Polarimetric SAR Offset Tracking Method [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(8): 624.
- [19] Woodhouse I H. Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications by Jong-Sen Lee and Eric Potier [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(1): 333-334.
- [20] Shen P, Wang C C, Gao H, et al. An Adaptive Nonlocal Mean Filter for PolSAR Data with Shape-Adaptive Patches Matching [J]. *Sensors*, 2018, 18

- (7): 2215.
- [21] Deledalle C A, Denis L, Tupin F, et al. NL-SAR: A Unified Nonlocal Framework for Resolution-Preserving(Pol)(in)SAR Denoising[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(4): 2021-2038.
- [22] Goodman N R. Statistical Analysis Based on a Certain Multivariate Complex Gaussian Distribution (an Introduction) [J]. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1963, 34(1): 152-177.
- [23] Conradsen K, Nielsen A A, Schou J, et al. A Test Statistic in the Complex Wishart Distribution and Its Application to Change Detection in Polarimetric SAR Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(1): 4-19.
- [24] Chen J, Chen Y L, An W T, et al. Nonlocal Filtering for Polarimetric SAR Data: A Pretest Approach[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(5): 1744-1754.
- [25] Crandell D R. Movement of the Slumgullion Earthflow Near Lake City, Colorado [J]. *Geologic and Hydrologic Sciences*, 1961(1): B136 - B139.
- [26] Milillo P, Fielding E J, Shulz W H, et al. COSMO-SkyMed Spotlight Interferometry over Rural Areas: The Slumgullion Landslide in Colorado, USA [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(7): 2919-2926.