



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 一种引入极化似然比检验的极化 SAR 滑坡形变监测方法
作者: 胡灿程, 汪长城, 沈鹏
DOI: 10.13203/j.whugis20200281
收稿日期: 2020-10-25
网络首发日期: 2021-07-26
引用格式: 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. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200281>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

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: 相较于传统单极化 SAR, 全极化 SAR (polarimetric synthetic aperture radar, 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原理 (polarimetric likelihood ratio test, PolLRT), 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。相比传统极化 SAR 偏移量跟踪方法而言, 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, 提高了极化信息匹配性能。最后, 通过覆盖美国科罗拉多州 Slumgullion 滑坡的全极化 UAVSAR (unmanned aerial vehicle SAR, UAVSAR) 数据来开展实验, 实验结果表明, 算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。

关键词: 形变监测; 极化似然比检验; 极化合成孔径雷达

中图分类号: P237

文献标识码: A

滑坡是我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的意义^[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 synthetic aperture radar, D-InSAR) 和像素偏移量跟踪等方法^[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 Michel 等人^[7-8]提出来的偏移量跟踪方法 (pixel offset tracking, POT) 有着其独特的形变监测优势, 一方面具备对较大位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

像的强度信息进行偏移量跟踪方法研究^[9-12], 目前单极化 SAR 偏移量跟踪方法主要分为以下三种: (1) 归一化互相关系数法 (normalized cross-correlation, NCC)^[1, 13-15], (2) 基于 Fourier 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, 因其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 数据的不断增多, 全极化 SAR 影像能够提供丰富的地物散射信息, 从而为偏移量跟踪方法实现更高精度、更加稳健的形变监测提供了较大潜力。在利用全极化 SAR 数据的极化散射信息进行形变估算的研究方面, Wang 等^[18]提出了一种全极化 SAR 偏移量跟踪方法——归一化内积方法 (polarimetric normalized inner product, PolNIP), 该方法基于 Pauli 基散射矢量构建

收稿日期: 2020-10-25

项目资助: 国家自然科学基金(41671356)。

第一作者: 胡灿程, 硕士生, 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

了主从影像的归一化矢量内积来描述相似度,从而提高偏移量跟踪方法的精度和稳健性。该方法虽然相较于传统单极化 SAR 偏移量跟踪方法的精度和稳健性有所提高,但是该方法仅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,因而其未充分发挥极化 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 偏移量跟踪算法中存在的问题,为了充分将地物目标的极化散射信息用于形变提取,本文基于复 Wishart 分布的极化似然比检验,采用极化相干矩阵来描述分布式目标,提出一种基于极化似然比检验的极化 SAR 偏移量跟踪方法来精准地提取形变^[13]。相较于 PolNIP 方法,本文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 UAVSAR 数据作为实验数据,从形变估算精度以及不同匹配窗口下的形变估算稳健性两个方面,对本文算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,本文算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。

本文的结构如下:第一节介绍了复相干矩阵统计特性与似然比检验原理、极化似然比检验偏移跟踪方法。第二节介绍了研究区域和数据,并从形变估算精度以及不同匹配窗口大小的形变估算效果两个方面,对实验结果进行了分析与讨论。最后在第三节得出结论。

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一种基于极化似然比检验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 S 来描述地物目标所包含的极化散射信息:

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

式中, S_{HH} 、 S_{VV} 为同极化分量, S_{HV} 、 S_{VH} 为

交叉极化分量。为了表示方便,将散射矩阵 S 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 $S_{HV} = S_{VH}$ 。

$$k_{pauli} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV} \quad S_{HH} - S_{VV} \quad 2S_{HV}]^T \quad (2)$$

式中, T 表示矩阵的转置。然后,将其转化为极化相干矩阵 T ^[19]用于表示分布式散射目标:

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

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:

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

式中, $T_{i,j}$ 、 $T'_{i,j}$ 分别表示原始相干矩阵元素、变换后相干矩阵在 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, $R \in W(q, n, \Sigma)$, $\Sigma = E(T)$, 则其概率密度函数^[14,22]可表示为

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

式中, $\text{Tr}(\cdot)$ 表示矩阵的迹, 然后

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

$\Gamma(\cdot)$ 表示 gamma 函数。复 Wishart 矩阵相似性检验方法可见于^[23]。 M 和 S 是独立的, 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,

似然比检验统计量可以表示为:

$$Q = \frac{P_T^{(q,n+m,\mathcal{E})}(M+S)}{P_T^{(q,n+m,\mathcal{E})}(M)P_T^{(q,n+m,\mathcal{E})}(S)} = \frac{(n+m)^{q(n+m)}|M|^n S^m}{n^q n^m q^m |M+S|^{n+m}} \quad (8)$$

一般情况下，矩阵 M 和 S 的视数是相等的，即 $m = n$ 。同时，通过取对数得

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

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

1.2 基于极化似然比检验的滑坡形变监测方法

偏移量跟踪方法的核心就在于如何估算主从影像匹配块的相似性，其相似性估算地越准确，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于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 ^[13, 19, 21, 22, 24]可以表示为：

$$H = \frac{\prod_{i \in W} P_T^{(q,n+m,\mathcal{E}_i)}(M+S_i)}{\prod_{i \in W} P_T^{(q,n+m,\mathcal{E})}(M_i) \prod_{i \in W} P_T^{(q,n+m,\mathcal{E})}(S_i)} = \prod_{i \in W} Q_i \quad (10)$$

其中 W 是匹配窗口内的像素集， \prod 是乘积操作符。在 $n = m$ 的典型情况时，可以对上式取对数，然后得到下式

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

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，根据两个匹配块的极化似然比检验相似度定义，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 $M = [M_1, M_2, \dots, M_k]$ 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 M 和 $S_k^{i,j}$ 。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，基于极化似然比检验的两个块间的偏移量可通过得到^[13]

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

最后，通过对相关平面峰值周围进行插值，以获得亚像素偏移量。如图1所示，即本文算法的完整流程。

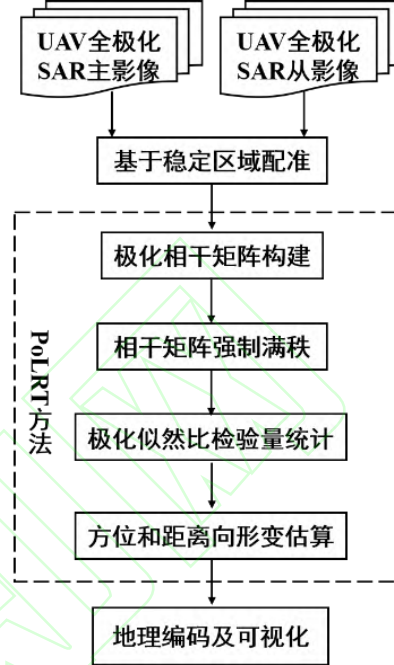


图1 本文方法的流程图

Fig. 1 Flowchart of the proposed method

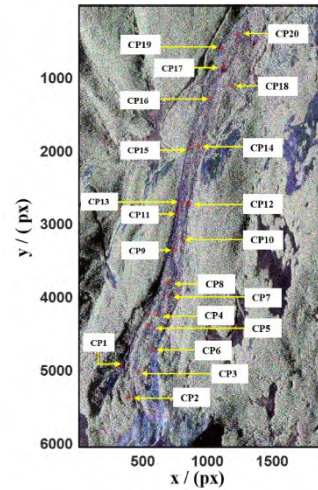


图2 研究区域的全极化 UAVSAR 影像 PauliRGB 图像 (R: $S_{-(HH+VV)}$ G: $S_{-(HH+VV)}$ B: S_{HV}) 及 GPS 控制点位置分布图

Fig.2 PauliRGB image (R: $S_{-(HH+VV)}$ G: $S_{-(HH+VV)}$ B: S_{HV}) of the UAVSAR data of the study area and the locations of GPS points

2 实验结果与分析

为了验证本文方法的形变提取性能，本文选取 2011 年 8 月 19 日和 2012 年 5 月 9

日的两景 L 波段全极化 UAVSAR 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($37^{\circ} 59' 30''$ N, $107^{\circ} 13' 25''$ W)。而之所以选择该滑坡作为研究区域,这是因为对该滑坡的各个方面,都已有大量的深入的研究与分析^[19, 25-26],因此,选取该滑坡作为研究区域,是偏移量跟踪方法形变估算性能验证的不二选择。实验采用的 UAVSAR 数据方位向采样间隔为 0.6 米,距离向采样间隔为 1.67 米。同时,本文采用与实验数据获取时间相对应的精准 GPS 数据,作为用于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 UAVSAR 影像得到的 PauliRGB 影像及 GPS 控制点的位置分布图。如图 3 所示,即本文方法在匹配窗口大小为 161×53 时,估算的方位向形变、距离向形变。

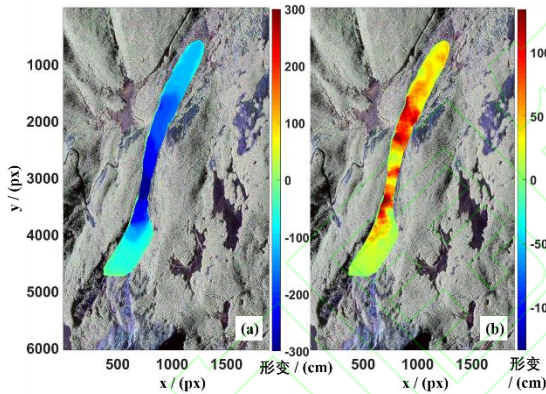


图3 本文方法在匹配窗口大小为 161×53 得到的方位向形变(a)、距离向形变(b)

Fig.3 Azimuth displacement (a), range displacement (b) estimated by the PolLRT method under the matching window of 161×53

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 偏移量跟踪方法的形变结果,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 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 方法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。从图中可以看出,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。对三种方法得到的每个控制点形变结果具体分析可知,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 方法得到的形变结果,但是两种方法得到的形变结果仍与 GPS 方法得到的形变有一定差距。由图 2 可知,这三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,PolLRT 和 PolNIP 都存在一定程度的误匹配,从而导致两种方法在这三个控制点得到的形变都与 GPS 方法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 方法得到的形变的差异并不大,但 PolNIP 方法在 CP11 控制点得到的形变与 GPS 方法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 和 PolNIP 的 RMSE 分别为 40.7 cm 和 85.4 cm,而 RMSE 越小,说明其与 GPS 结果越一致,精度越高。换言之,相对于 PolNIP,PolLRT 形变估算的精度越高,因此在形变估算精度方面,PolLRT 方法也是优于 PolNIP 方法的。

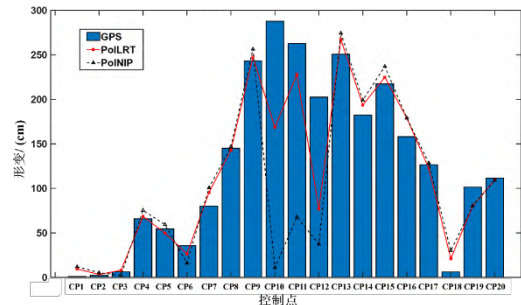


图4 PolLRT、PolNIP 以及 GPS 方法得到的形变结果对比, GPS 控制点分布在图 2

Fig.4 Displacements estimated by the PolLRT, PolNIP and GPS method, respectively and the GPS control points are shown in Fig.2

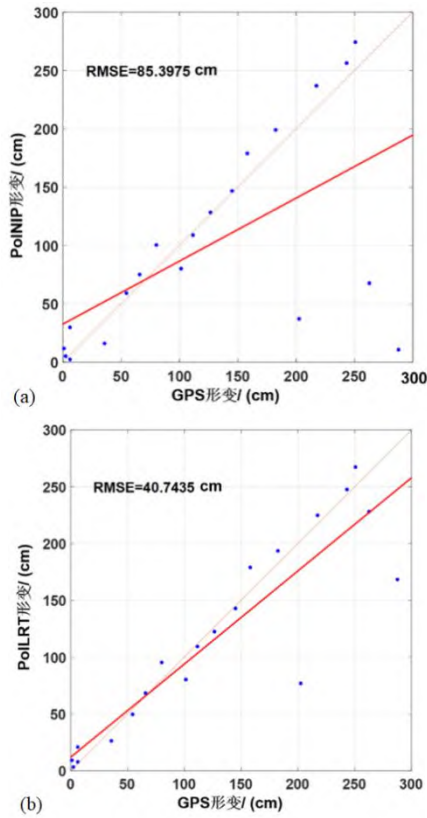


图 5 PolNIP(a)和 PolLRT(b)相对于 GPS 方法形变结果的散点图及其 RMSE

Fig.5 Scatter diagrams and the corresponding RMSE of the PolLRT (a) and PolNIP (b) methods to the GPS method, respectively

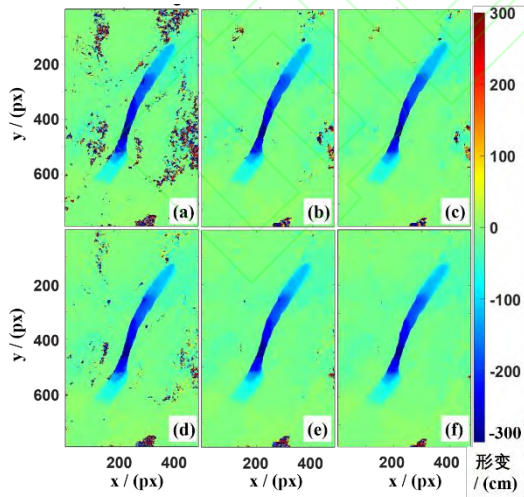


图 6 PolNIP 方法(a)、(b)、(c) 和 PolLRT 方法(d)、(e)、(f) 在不同匹配窗口 (65×25、129×49、161×53) 的方位向形变

Fig.6 Azimuth displacements of the PolNIP method (a), (b), (c) and the PolLRT method (a), (b), (c) under different sizes of matching window (65×25, 129×49, 161×53)

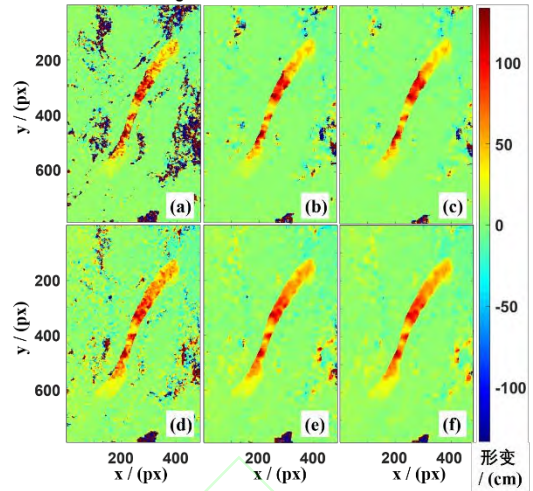


图 7 PolNIP 方法(a)、(b)、(c) 和 PolLRT 方法(d)、(e)、(f) 在不同匹配窗口 (65×25、129×49、161×53) 的距离向形变

Fig.7 Range displacements of the PolNIP method (a), (b), (c) and the PolLRT method (d), (e), (f) and under different sizes of matching window (65×25, 129×49, 161×53)

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, 本文采用三个大小依次增加 (65×25、129×49、161×53) 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。从图中可以看出, 在三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, 本文方法相较于 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。然后, 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, 三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。

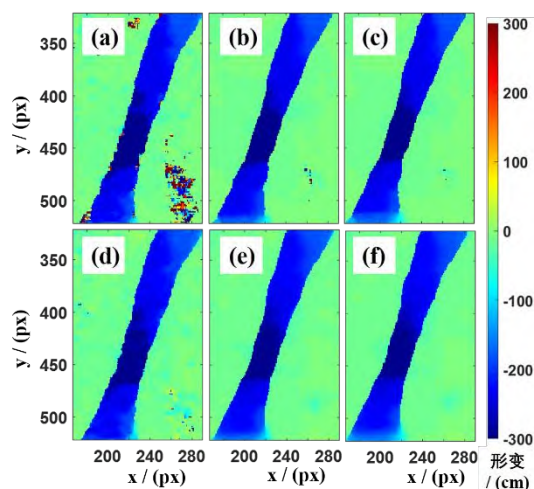


图8 PolNIP 方法(a), (b), (c)和 PolLRT 方法(d), (e), (f)在不同匹配窗口时 (65×25 , 129×49 , 161×53) 的方位向形变中部放大图

Fig.8 Enlarged drawing of the middle part of the azimuth displacements of the PolNIP method (a), (b), (c) and the PolLRT method (d), (e), (f) under different sizes of matching window (65×25 , 129×49 , 161×53)

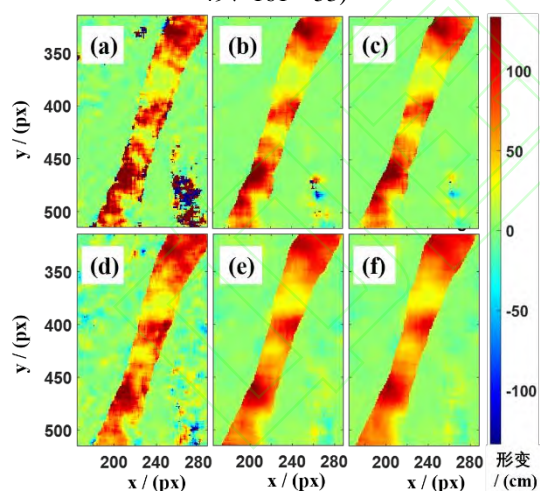


图9 PolNIP 方法(a), (b), (c)和 PolLRT 方法(d), (e), (f)在不同匹配窗口时 (65×25 , 129×49 , 161×53) 的距离向形变中部放大图

Fig.9 Enlarged drawing of the middle part of range displacements of the PolNIP method (a), (b), (c) and the PolLRT method (d), (e), (f) under different sizes of matching window (65×25 , 129×49 , 161×53)

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, 提出了一种基于极化似然

比检验的极化 SAR 滑坡形变提取方法。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, 从而提高了偏移量跟踪方法在采用极化 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 UAVSAR 影像作进行实验。为了验证本文方法形变估算性能, 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, 本文方法和 PolNIP 方法的 RMSE 分别是 40.7 cm、85.4 cm, 可以看出, 本文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, 本文方法相对于 PolNIP 方法, 三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。这是因为本文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极化似然比检验的全极化 SAR 偏移量跟踪方法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 (References)

- [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 in China since the 20th century and their mechanism[J]. *Journal of Rock Mechanicals and Engineering*, 2007, 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, 3: 433-454)
- [3] DAI Keren, ZHUO Guanchen, XU Qiang, LI Zhenhong, LI Weile, GUAN Wei. 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, 李振洪, 李为乐, 管威. 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, ZHAO Kuanyao, DONG Jie, JIANG Houjun, LIAO Mingsheng. 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, 赵宽耀, 董杰, 蒋厚军, 廖明生. 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, Ferro-Famil L, 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: Solid Earth*, 1989, 94(1): 9183-9191
- [7] Michel R, Avouac J, 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, 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, Balz T, Shi X, Jiang Y. Monitoring Landslide Activities in the Three Gorges Area with Multi-frequency Satellite SAR Data Sets[J]. *Modern Technologies for Landslide Monitoring and Prediction*, 2015, 181-208
- [10] Li J, Li Z W, Wang C C, et al. SAR offset tracking technique estimates the movement of the ice-rich glacier in the southern part of the tianshan mountain [J]. *Journal of geophysics*, 2013, 56(4): 1226-1236 (李佳, 李志伟, 汪长城, 朱建军, 丁晓利. 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, Zhu J J. 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, Wang Q. An adaptive offset tracking method with SAR images for landslide displacement monitoring [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(8): 830
- [13] Wang C C, Shen P, Li X, Zhu J, Li Z. 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): 1-15
- [14] Lee J S, Hoppel K W, Mango S. A, Miller A. R. 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 parametrization for sea ice drift retrieval from SAR data [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 258
- [16] Tong X, 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, Prats P. 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] Lee J S, Pottier E. Polarimetric radar imaging: from basics to applications [J]. *International*

- Journal of Remote Sensing* . 2009 , 33(1) : 333-334
- [20] ShenP, WangC, GaoH, ZhuJ, An adaptive nonlocal mean filter for PolSAR data with shape-adaptive patches matching, *Sensors*, 2018 , 18(7) : 2215
- [21] DeledalleCA, DenisL, TupinF, ReigberA, JägerM . NL-SAR: A unified nonlocal framework for resolution-preserving (Pol)(In) SAR denoising, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014 , 53(4) : 2021-2038
- [22] GoodmanN. R, Statistical analysis based on a certain multivariate complex Gaussian distribution (an introduction) [J]. *Ann. Math. Stat.*, 1963 , 34(1) : 152-177
- [23] ConradsenK, NielsenA. A, SchouJ, SkriverH, 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] ChenJ, ChenY, AnW, CuiY, YangJ, Nonlocal filtering for polarimetric SAR data: A pretest approach [J].*IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010 ,49(5) : 1744–1754
- [25] CrandellD. R, Movement of the Slumgullion earthflow near Lake City, Colorado [J]. *Short Papers in the Geologic and Hydrologic Sciences* , 1961 , B136–B139
- [26] MililloP, FieldingE. J, ShulzW. H, DelbridgeB, BurgmannR, 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

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

HU Cancheng^{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: Compared with the traditional single-polarization SAR, the full-polarization SAR can obtain more abundant polarimetric scattering information and describe the geometric and physical characteristics of the target more comprehensively. To make full use of the polarimetric scattering information of ground objects, the paper utilizes 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. Compared with the traditional method, the 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. Finally, in the real experiment, two fully polarized Unmanned Aerial Vehicle SAR (UAVSAR) data are used as the experimental data, and the external global positioning system (GPS) deformation data is used as the reference data. 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.

Keywords: deformation monitoring, polarimetric likelihood ratio test, polarimetric synthetic aperture radar

First author: HU Cancheng, postgraduate, the main research direction is landslide deformation monitoring by polarimetric SAR. E-mail: hucancheng@csu.edu.cn

Corresponding author: WANG Changcheng, PhD, professor. E-mail: wangchangcheng@csu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41671356) .