



改进的 CR-InSAR 技术用于四川甲居滑坡形变监测

敖 萌¹ 张 勤^{1,2} 赵超英^{1,2} 刘广全¹

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

2 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西 西安,710054

摘要:采用一种改进的基于相位相干性的非线性人工角反射器 InSAR 解算算法,不仅能有效地避免相位解缠误差,而且对于大尺度形变梯度具有较强的探测能力。将该方法用于四川丹巴县甲居滑坡形变监测试验,获取了位于甲居滑坡上角反射器的形变结果。通过与小基线集 InSAR 算法以及基于解缠相位的 CR-InSAR 算法结果比较,该方法更能准确获取非线性形变时间序列结果,合理地揭示了甲居滑坡明显的形变特征。

关键词:甲居滑坡;非线性形变;监测;人工角反射器

中图法分类号:P225; P642 **文献标志码:**A

甲居滑坡位于四川省丹巴县聂呷乡甲居村,滑坡长 1 200 m,宽 1 000 m,滑体平均厚度 22 m,体积约为 2 600 万 m³,属特大型牵引式中深层土质滑坡^[1]。为监测该滑坡的活动性,文献[2-4]采用 GPS 和 InSAR 技术进行了周期性观测和融合处理。但由于 GPS 时间和空间采样率均较低,难以监测该滑坡的时间发育特征,而且研究区域地形起伏较大,特别是植被茂密导致传统差分 InSAR 技术在该地区的时空失相干非常严重,形变监测结果精度有待进一步提高,限制了差分 InSAR 技术的应用。

人工角反射器干涉技术(corner reflector-InSAR)通过在监测体布设一定数量的人工散射体来克服时空失相干对差分 InSAR 技术的影响,从而用来高精度探测地形复杂区域的形变。目前,常用的 CR-InSAR 解算方法有 Lambda 算法^[5-8]和最小费用流算法等,这些算法要求 CR 点能够成功解缠,但是,很多时候两个 CR 点间的形变相位超过雷达半波长,相位解缠变得异常困难。为此,Xia 等提出 CR-InSAR 周期图算法^[9-10],针对每个 CR 点建立一个周期图,这样对于每个 CR 点,其相位时间序列可以看成是一个关于时间间隔和垂直基线的二维谐振信号,因此,形变估计问题就转化成频谱估计问题^[11-19]。但是该算法进行参数估计时,对干涉对数量、各干涉对时间和空间

基线分布的均匀性都有较高要求,而且在获取非线性形变时经常采用滤波的方法,导致形变结果较为平滑,非线性形变不明显。

本文借鉴 InSAR 小基线集算法和 CR-InSAR 周期图算法,采用一种非线性 CR-InSAR 算法,对甲居滑坡进行了非线性 CR-InSAR 试验,通过与 GPS 监测形变结果一致性的比较,表明该算法比原 CR-InSAR 算法获取的滑坡形变结果更为合理。

1 CR-InSAR 解算原理及算法

假设有 $M+1$ 个角反射器,获取 $N+1$ 幅 SAR 影像,按照传统小基线集 InSAR 处理方法,选取其中一幅影像作为主图像,可以组成 N 个 SAR 干涉对,每个干涉对包含了 $M+1$ 个 CR 点对应的相对于主影像的差分相位。通过 SAR 轨道信息和外部 DEM 去除地形相位后,第 i 个 CR 点在第 m 个差分干涉图中的差分相位表示为:

$$\varphi_{im} = -2\pi k_{im} + \frac{4\pi R_{im}}{\lambda} + \frac{4\pi B_m h_i}{\lambda R_m \sin \theta_m} + \varphi_{im, atom} + \varphi_{im, noise} \quad (1)$$

式中, R_{im} 是对应的形变; B_m 是垂直基线; h_i 是第 i 个 CR 点的高程改正数; θ_m 是入射角; $\varphi_{im, atom}$ 是大气延迟相位, $\varphi_{im, noise}$ 是噪声相位。

收稿日期:2015-05-27

项目资助:国家 973 计划(2014CB744703);国家自然科学基金(41372375,41274005,41304016,41202245)。

第一作者:敖萌,博士生,主要从事合成孔径雷达干涉测量研究。aomeng317@163.com

通讯作者:张勤,博士,教授。zhangqinle@263.net.cn

如果将CR点形变看成近似线性形变，则式(1)可以写成：

$$\varphi_{im} = -2\pi k_{im} + \frac{4\pi V_i T_m}{\lambda} + \frac{4\pi B_m h_i}{\lambda R_m \sin \theta_m} + \varphi_{im, \text{atom}} + \varphi_{im, \text{noise}} \quad (2)$$

式中, V_i 是第 i 个 CR 点的形变速率; T_m 是第 m 个干涉图的时间间隔。当两个 CR 点间的距离为 1 km 时, 大气延迟相位可以认为是空间强相关的, 如果选取其中一个比较稳定的 CR 点作为参考点, 则其他的 CR 点相对于参考 CR 点的差分相位可以表示为:

$$\Delta\varphi_{i, \text{ref}} = -2\pi\Delta k_{i, \text{ref}} + \frac{4\pi\Delta V_{i, \text{ref}} T_m}{\lambda} + \frac{4\pi B_m \Delta h_{i, \text{ref}}}{\lambda R_m \sin \theta_m} + \Delta\varphi_{i, \text{ref}}^{\text{noise}} \quad (3)$$

1.1 基于解缠相位的 CR-InSAR 算法

对式(3)采用最小费用流或 Lambda 算法解缠得到:

$$\Delta\varphi_{i, \text{ref}} = \frac{4\pi\Delta V_{i, \text{ref}} T_m}{\lambda} + \frac{4\pi B_m \Delta h_{i, \text{ref}}}{\lambda R_m \sin \theta_m} + \Delta\varphi_{i, \text{ref}}^{\text{noise}} \quad (4)$$

式中, $\varphi_{i, \text{ref}}$ 为解缠相位, 对每个 CR 点的解缠相位对 N 个干涉图采用最小二乘准则(或奇异值分解)解算, 获取每个 CR 点的累计形变时间序列结果, 该方法的应用前提是要求 CR 点相位能够准确解缠。但当两 CR 点间的形变相位差大于 $|\pi|$ 时, 无法准确解缠, 从而导致形变时间序列错误。

1.2 基于二维周期图的线性形变算法

文献[9]等提出基于二维周期图的线性形变解法, 如果将 CR 点形变看成线性形变, 选择位于稳定区域的 CR 点为参考点, 假设其形变速率为 0, 建立如下模型:

$$\varphi_i = \frac{4\pi V_i T_m}{\lambda} + \frac{4\pi B_m h_i}{\lambda R_m \sin \theta_m} + \varphi_{im, \text{atmo}} + \varphi_{im, \text{noise}} \quad (5)$$

式中, $\Delta\varphi_i$ 为第 i 个 CR 点相对于参考点的差分干涉相位; V_i 为第 i 个 CR 点的线性形变速率; h_i 为第 i 个 CR 点相对于参考点的高程改正数, 若两个 CR 点间的距离不是很远, 大气延迟相位忽略不计, 式(5)可以写成:

$$\varphi_i = 2\pi f_{iv} t + 2\pi f_{ih} b + \varphi_{i, \text{noise}} \quad (6)$$

式中, $f_{iv} = 2V_i/\lambda$; $t = T_m$; $f_{ih} = 2h_i/\lambda R_m \sin \theta_m$; $b = B_m$; $\varphi_{i, \text{noise}}$ 是独立的高斯噪音, 均值为 0。

为了求解形变速率相关的频率 f_{iv} 以及和高程改正值相关的频率 f_{ih} , 对于每个 CR 点构造一个周期图:

$$E_{(f_v, f_h)} = \left| \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (e^{j2\pi f_v t_m} e^{j2\pi f_h b_m} e^{-j\varphi_i}) \right|^2 \quad (7)$$

当 $E_{(f_v, f_h)}$ 达到最大值时, 根据对应的频率 f_{iv} 和 f_{ih} 很容易得到所要求的形变速率值以及高程改正值。然而干涉对数量、干涉对时间基线和空间基线分布的均匀性都会对参数估计的精度产生影响, 而且采用滤波的手段获取非线性形变会导致形变结果线性较为明显。

1.3 基于相位相干性的非线性 CR-InSAR 算法

本文采用一种改进的基于相位相干性的非线性 CR-InSAR 算法, 定义相位相干性为:

$$\gamma = \left| \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (e^{j(\frac{4\pi V_i T_m}{\lambda} + \frac{4\pi B_m h_i}{\lambda R_m \sin \theta_m} - \varphi_i)}) \right| \quad (8)$$

该约束条件相当于一个最优函数, 依据一定的先验信息确定解空间的大小、位置和搜索步长, 即可较快地获得参数的最佳估计值。当估计参数越接近真值时, γ 就越大, 也就是说 γ 越大, 参数求解的精度就越高。

因此, 给定一个二维解空间, 在解空间内搜索 γ 的最大值, 与最大值对应的形变速率值和高程改正数值就是所求解的参数, CR 点相位相干性的三维图如图 1 所示。

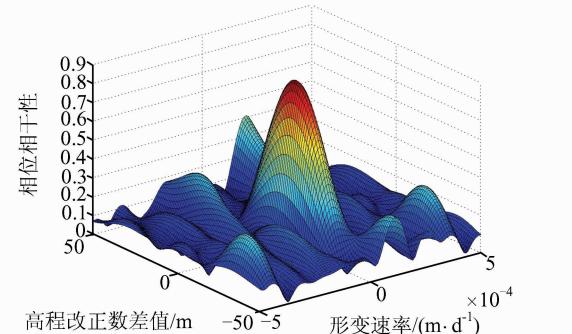


图 1 CR 点相位相干性的三维图

Fig. 1 3D Phase Coherence of CR Points

将与形变速率和高程改正数有关的相位从差分干涉相位中减掉, 可得到残余相位:

$$\varphi_{\text{res}} = \varphi_i - \frac{4\pi V_i T_m}{\lambda} - \frac{4\pi B_m h_i}{\lambda R_m \sin \theta_m} \quad (9)$$

依据最小二乘准则将非线性形变相位当成未知参数进行求解, 由于大气相位在时间域上表现为高频信号, 而在空间域上表现为低频信号。因此, 当 CR 点距离小于 1 km 时, 将其和噪音相位一起当成随机误差处理, 可以得到:

$$\varphi_{\text{res}} = \varphi_{nl} + \varphi_{\text{noise}} \quad (10)$$

式中, $\varphi_{nl} = \frac{4\pi}{\lambda} S_{nl}$ 为非线性形变相位, S_{nl} 为非线性形变。

因此, CR 点的形变可以表示为:

$$S(T_m) = T_m V_i + S_{nl}(T_m) \quad (11)$$

基于相位相干性的非线性 CR-InSAR 数据处理流程如图 2 所示。

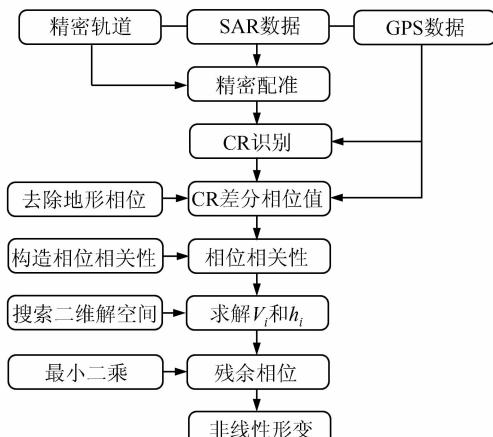


图 2 基于相位相干性的非线性 CR-InSAR 数据处理流程图

Fig. 2 Flowchart of Nonlinear CR-InSAR Data Processing Based on Phase Coherence

2 模拟实验

为了验证本文采用算法的可靠性,首先对模拟数据进行了实验分析,模拟线性形变速率为 -0.4 mm/d ,高程改正数为 50 m ,非线性形变采用正弦函数进行模拟,分别采用 Lambda 算法、二维周期图算法以及本文采用的算法进行求解,并与模拟真值进行对比,对比结果如图 3 所示。

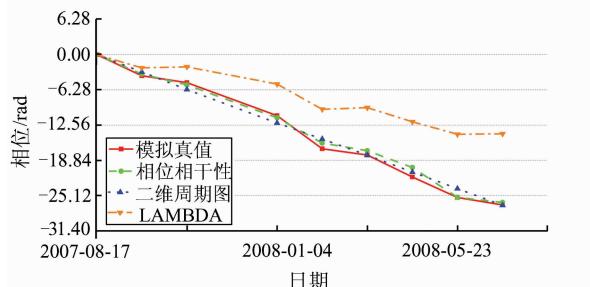


图 3 模拟实验结果对比图

Fig. 3 Comparison of Simulation Results

从图 3 可以看出,由于模拟数据的形变尺度较大,导致 Lambda 算法存在明显解缠误差,而本文采用基于相位相干性的算法求解得到线性形变速率为 -0.387 mm/d ,高程改正数为 65.9 m ,而且与二维周期图算法求解结果相比,非线性形变也恢复较好。从对比结果来看,本文算法不需要相位解缠即可获取 CR 点的形变信息,求解结果与模拟真值较为一致,对大尺度形变梯度具有较强探测能力,现将该算法应用于甲居滑坡 CR 点

形变监测分析。

3 数据处理方案与结果分析

图 4 为四川甲居滑坡地形图,自 2007 年布设了 10 台角反射器,30 个 GPS 监测点,每年进行 4 期 GPS 观测。结果显示,该滑坡形变具有分区特征,可分为强变形区、弱变形区和潜在形变区。为此获取了覆盖研究区域自 2007-08 至 2008-06 的 9 景 Envisat ASAR 数据,开展 InSAR 监测与试验。

在 InSAR 数据处理中采用 90 m 分辨率的 SRTM DEM,该 DEM 在山区的平面精度为 20 m ,高程精度为 20 m ^[11]。

首先通过小基线集 InSAR 来检验研究区域的相干性以及结果中可能存在的误差。在此基础上对比两种 CR-InSAR 解算方法,并对解算结果与同期 GPS 监测结果进行比较,验证本文方法的可靠性。

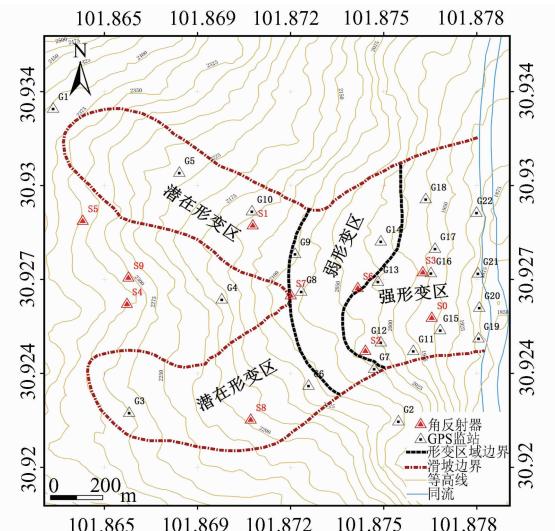


图 4 甲居滑坡地质和形变监测图

Fig. 4 Geological and Deformation Monitoring Chart of Jiaju Landslide

3.1 小基线集 InSAR 结果

本文以 Gamma 软件作为差分 InSAR 干涉处理平台,共生成 36 个干涉对,基线分布如图 5 所示。图 6(a)为生成的 36 个干涉对的相干图;图 6(b)为对应的解缠图。

从相干图和解缠图中可以看出,研究区域由于植被等因素的影响,相干性很差,导致解缠误差难以消除,因此,本文仅对相干性最好的两个干涉对(2008-01-04 ~ 2008-02-08 和 2008-02-08 ~ 2008-03-14)进行常规差分处理,获得的形变结果

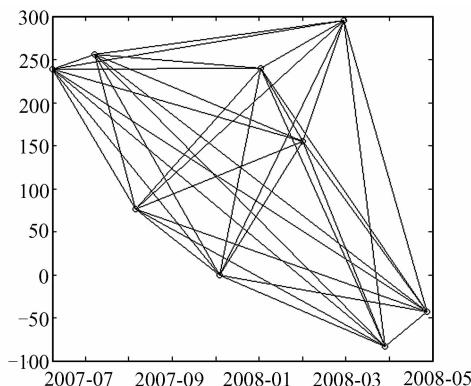


图 5 甲居地区获取的 SAR 数据基线分布

图(20080104)

Fig. 5 Baseline of Envisat ASAR Data(20080104)

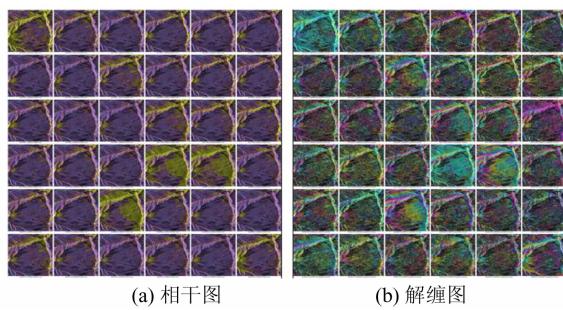


图 6 36个干涉图相干图和解缠图

Fig. 6 Coherence Chart and Unwrapping Chart of 36 Interferograms

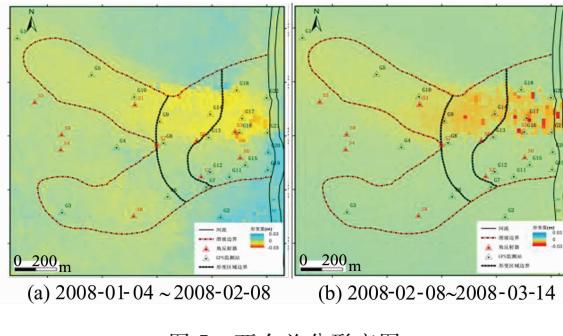


图 7 两个差分形变图

Fig. 7 Two Differential Deformation Chart

如图 7 所示, 两个干涉对均存在明显形变信息, 最大沉降量 3 cm 左右(35 d)。

3.2 基于解缠相位的 CR-InSAR 解算

由于角反射器具有很强的后向散射特性, 它在 SAR 图像中表现为一个光斑状的点目标, 很容易在强度图中将其与周围的相干地物区分开来, 图 8 为安装在甲居滑坡上的角反射器在强度图中的近似位置。

在获得 CR 点的近似位置周围开一个窗口, 通过多倍内插计算其幅度的峰值的精确位置, 从而获取 CR 点亚像素级的精确坐标。图 9 为某一

CR 点子像元级坐标幅度图。

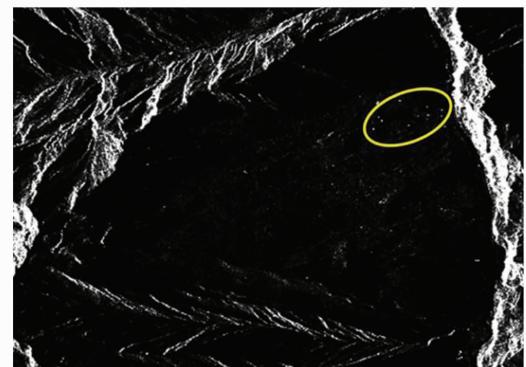


图 8 甲居滑坡角反射器在强度图中的显示

Fig. 8 Display of CRs in Intensity Map

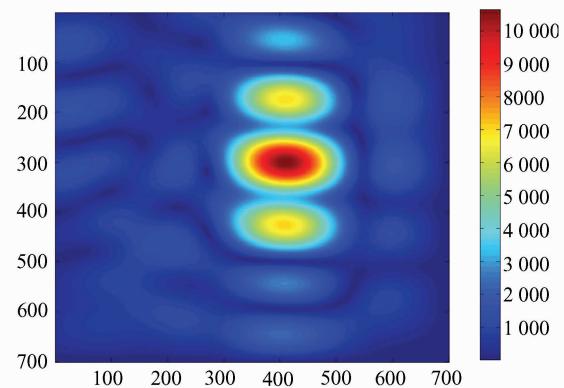


图 9 某一 CR 点的子像元级幅度图

Fig. 9 Sub-pixel Level Amplitude Diagram of CR

直接提取 35 个干涉对解缠图中的解缠相位, 采用最小二乘解算获取 CR 点的形变时间序列, 结果如图 10 所示。

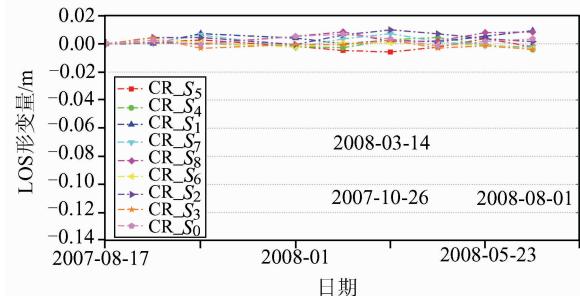


图 10 基于 SBAS 的 CR 形变时间序列图

Fig. 10 Time Series Deformation of CR Based on SBAS

从图 10 可以看出, 形变结果在 ± 1 cm 之间变动, 造成此现象的原因是由于 SAR 干涉对存在解缠误差(图 6(b)), 导致 CR 解算结果存在解缠误差, 形变时间序列结果不正确。

3.3 基于二维周期图的 CR-InSAR 算法

根据式(5)~式(7), 以位于稳定区的 S_9 号 CR 点为参考点, 其他 9 个 CR 点的形变时间序列

如图 11 所示。

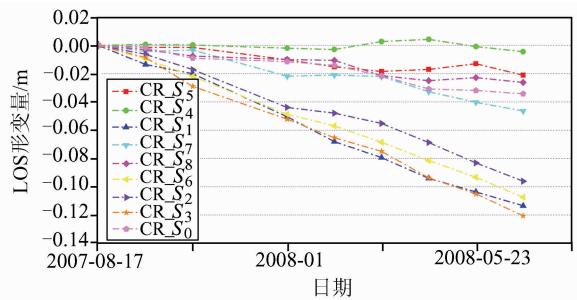


图 11 基于二维周期图法的 CR 形变时间序列图

Fig. 11 Time Series Deformation of CR
Based on 2D Periodogram

从图 11 中可以看出,基于二维周期图法的 CR-InSAR 算法能够有效避免相位解缠误差,但该方法由于使用滤波的方法分离非线性形变,导致非线性形变有一定损失。

3.4 基于相位相干性的非线性 CR-InSAR 解算方法

与 § 3.2 不同,本文算法仅提取 CR 点对应的差分缠绕相位,基于式(8)~式(11),解算出 CR 点的形变时间序列。

以位于稳定区的 S9 号 CR 点为参考点,其他 9 个 CR 点的形变时间序列如图 12 所示,累计形

变结果如表 1 所示。

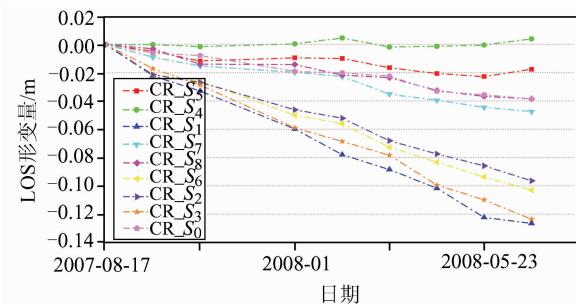


图 12 基于相位相干性的非线性 CR 形变时间序列图

Fig. 12 Nonlinear Time Series Deformation of CR Based on Phase Coherence

从上述 3 种算法解算结果来看,非线性形变都不是特别明显,分析原因主要是由于 CR 点间距离较近,非线性形变在空间域上表现出一定的相关性,两个 CR 点间干涉相位做差分的同时,非线性形变也会有一定的损失,再采用滤波方法分离非线性形变,会导致非线性形变进一步损失,因此我们根据大气相位在空间域和时间域表现出的不同特性,将其和噪声相位一起当成随机误差处理,采用最小二乘的方法,将非线性形变当成参数求解,尽可能减小非线性形变的损失。

表 1 甲居滑坡角反射器累计形变结果表

Tab. 1 Accumulative Deformation of CR Points

形变区域	稳定区		北侧滑坡		南侧滑坡		弱形变区		强形变区	
	CR 点号	S ₅	S ₄	S ₁	S ₈	S ₇	S ₆	S ₂	S ₃	S ₀
累计形变量/cm		-1.8	0.4	-12.7	-3.9	-4.8	-10.3	-9.7	-12.4	-3.9

从上面 CR 点的累计形变结果可以看出,位于参考点附近的 S₄ 号 CR 点比较稳定,累计形变量 0.4 cm,其他 CR 点均出现明显沉降形变,其中位于北侧滑坡体上沿南面的 S₅ 号 CR 点累计形变量 -1.8 cm,位于北侧滑坡体上的 S₁ 号 CR 点累计形变量 -12.7 cm,位于南侧滑坡体上的 S₈ 号 CR 点累计形变量 -3.9 cm,位于弱形变区的 S₇ 号 CR 点累计形变量为 -4.8 cm,而位于强形

变区的 S₆、S₂、S₃ 和 S₀ 号 CR 点累计形变量分别达到 -10.3 cm、-9.7 cm、-12.4 cm 和 -3.9 cm。

在甲居滑坡上布设的 10 个角反射器中有 6 个的周围布设了 GPS 监测站,为了更好地验证本算法的准确性,将基于本文 CR-InSAR 解算结果和基于解缠相位解算结果与 GPS 解算结果进行比较,如表 2 所示。

表 2 基于相位相干性 CR 解算结果、基于解缠相位 CR 结果与 GPS 解算结果对比表

Tab. 2 Comparison Between CR Results Based on Phase Coherence and Phase Unwrapping with GPS Method

GPS 点号	G ₁₀	G ₈	G ₁₂	G ₁₃	G ₁₆	G ₁₅
GPS 解算结果/cm	-9.5	-4.6	-4.4	-3.3	-11.0	-3.6
CR 点号	S ₁	S ₇	S ₂	S ₆	S ₃	S ₀
基于相位相干性结果	-12.7	-4.8	-9.7	-10.3	-12.4	-3.9
与 GPS 差值	-3.2	-0.2	-5.3	-7.0	-1.4	-0.3
基于解缠相位结果	0.9	-0.2	0.2	-0.3	-0.4	0.4
与 GPS 差值	10.4	4.4	4.6	3.0	10.6	4.0

从表2第5行和第7行可以看出,基于解缠相位的解算结果与GPS解算结果相差较大,而基于相位相干性的CR-InSAR解算结果与GPS解算结果在反映甲居滑坡形变特征上有较好的一致性,但 S_1 、 S_2 和 S_6 号CR点的解算结果与GPS解算结果相差较大,对于与GPS结果存在差异,原因有以下几个方面:①在监测点的位置上, GPS点和CR点之间存在一定的距离,我们将CR点附近的GPS点作为参照,提供一定的先验信息;②在结果的获取时间上,由于没有对应的GPS监测结果,只获取2006-08~2009-11共39个月的累计形变结果,然后取平均求得对应InSAR数据覆盖的10个月的结果,也可能导致存在差异;③在变形特征上,甲居滑坡存在一定的水平形变, InSAR对水平方向形变不敏感,而且GPS在高程方向上的监测精度较低(1 cm),将GPS上三维形变结果投影到视线方向时也存在一定的误差。但从CR点整体解算结果来看,较为真实地反映了该滑坡的形变特征。

参 考 文 献

- [1] Zhang Qingzhi, Zheng Wanmo, Ba Renji, et al. Highly Precise GPS Monitoring Devices for Stability Analysis of Yakaze Landslide, Danba, Sichuan[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(2): 250-259 (张清志, 郑万模, 巴仁基, 等. 应用高精度GPS系统对四川丹巴雅喀则滑坡进行监测及稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2013, 21(2): 250-259)
- [2] Deng Guoshi, Zheng Wanmo, Yang Guihua, et al. GPS Monitoring of the Jiaju Landslide in Danba, Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2011, 31(2): 99-104 (邓国仕, 郑万模, 杨桂花, 等. 四川丹巴县甲居滑坡GPS监测结果及分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2011, 31(2): 99-104)
- [3] Bai Yongjian, Zheng Wanmo, Deng Guoshi, et al. Three-Dimensional System Monitoring and Numerical Simulation on the Dynamic Deformation Process of Jiaju Landslide in Danba, Sichuan[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(5): 974-981 (白永健, 郑万模, 邓国仕, 等. 四川丹巴甲居滑坡动态变形过程三维系统监测及数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 974-981)
- [4] Yin Yueping, Zheng Wanmo, Liu Yuping, et al. Integration of GPS with InSAR to Monitoring of the Jiaju Landslide in Sichuan, China[J]. *Landslides*, 2010, 7: 359-365
- [5] Zhu Wu, Zhang Qin, Zhao Chaoying, et al. Monitoring Ground Fissures in Xi'an Area by Use of CR-InSAR[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, 30(6): 20-30 (朱武, 张勤, 赵超英, 等. 基于CR-InSAR的西安市地裂缝监测研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(6): 20-30)
- [6] Long Jiangping, Ding Xiaoli, Li Zhiwei, et al. LAMBDA Method Applied to Phase Unwrapping in CR-InSAR[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2008, 28(3): 100-103 (龙江平, 丁晓利, 李志伟, 等. LAMBDA方法在CR-InSAR相位解缠中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(3): 100-103)
- [7] Xu Caijun, He Ping, Wen Yangmao, et al. Crustal Deformation Monitoring of Xianshuihe Fault by CR-InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(3): 302-305 (许才军, 何平, 温扬茂, 等. 利用CR-InSAR技术研究鲜水河断层地壳形变[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(3): 302-305)
- [8] Xing Xuemin, Zhu Jianjun, Wang Changcheng. A New Method for CR Point Identification and Its Application to Highway Deformation Monitoring [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(6): 699-703. (邢学敏, 朱建军, 汪长城. 一种新的CR点目标识别方法及其在公路形变监测中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(6): 699-703)
- [9] Xia Ye, Kaufmann H, Guo X F, et al. Landslide Monitoring in the Three Gorges Area Using DInSAR and Corner Reflectors[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2004, 70(10): 1 167 -1 172
- [10] Xia Ye, Kaufmann H, Guo X F. CR-Based SAR-Interferometry for Landslide Monitoring[C]. IEEE 2008 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, 2008
- [11] Farr T G, Rosen P A, Caro E, et al. The Shuttle Radar Topography Mission[J]. *Reviews of Geophysics*, 2004, 45, doi:10.1029/2005RG000183
- [12] Fu Wenzhong, Guo Huadong, Tian Qingjiu, et al. Landslide Monitoring by Corner Reflectors Differential Interferometry SAR[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(24): 6 387-6 400
- [13] Zhu Wu, Zhang Qin, Ding Xiaoli, et al. Landslide Monitoring by Combining of CR-InSAR and GPS [J]. *Techniques Advances in Space Research*, 2014, 53: 430-439
- [14] Ferretti A, Savio G, Barzaghi R, et al. Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3977-3986

- and Remote Sensing*, 2007, 45(5): 1 142-1 153
- [15] Crosetto M, Gili J A, Monserrat O, et al. Interferometric SAR Monitoring of the Vallcebre Landslide (Spain) Using Corner Reflectors[J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2013, 13: 923-933
- [16] Tu Pengfei, Chen Hua, Gan Weijun. Application of CRInSAR in Monitoring Landslide Deformation in Three Gorges Reservoir Area[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, 30(1): 126-134(涂鹏飞, 谌华, 甘卫军. 应用 CRInSAR 技术监测三峡库区滑坡形变[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(1):126-134)
- [17] Hu Jun, Zhu Jianjun, Li Zhiwei. On CR-InSAR and Its Morbid Equation[J]. *Journal of Geomatics*, 2007, 32(5): 30-32(胡俊, 朱建军, 李志伟. CR-InSAR 技术及其病态方程的研究[J]. 测绘信息与工程, 2007, 32(5): 30-32)
- [18] Liu Guoxiang, Ding Xiaoli, Chen Qiang, et al. Estimating Spatiotemporal Ground Deformation with Improved Permanent-scatterer Radar Interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8): 159-170
- [19] Liu Guoxiang, Jia Hongguo, Zhang Rui, et al. Exploration of Subsidence Estimation by Persistent Scatterer InSAR on Time Series of High Resolution TerraSAR-X Images[J]. *IEEE Journal of Selected Topics In Applied Earth Observation And Remote Sensing*, 2011, 4(1): 2 762 -2 772

An Improved CR-InSAR Technology Used for Deformation Monitoring in Jiaju Landslide, Sichuan

AO Meng¹ ZHANG Qin^{1,2} ZHAO Chaoying^{1,2} LIU Guangquan¹

1 School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering,

Ministry of Education, Xi'an 710054, China

Abstract: CR-InSAR is to lay a number of artificial scatterers in the study area to overcome the spatial and temporal decorrelation effect on D-InSAR and to detect high precision deformation of complex terrain area. However, when the deformation between two CR points is more than half radar wavelength, phase unwrapping is becoming extremely difficult. At present, common phase unwrapping methods used for CR-InSAR are Lambda algorithm, minimum cost flow algorithm, et al, but these algorithms all require successfully unwrapping. In the paper, we adopt an improved nonlinear artificial corner reflectors InSAR algorithm based on phase coherence. This method can not only avoid the phase unwrapping error effectively, but also has the strong capability to detect the large scale deformation gradient. In the separation of nonlinear deformation, according to the different characteristics of atmospheric phase in special and temporal domain, taking atmospheric phase and noise phase together as random error, applying the least square method to calculate nonlinear deformation parameters to reduce the loss of nonlinear deformation as far as possible. Taking Jiaju landslide located in Danba County of Sichuan Province as an example, we obtain the deformation of the corner reflectors placed in Jiaju landslide. By comparing the result with that of the SBAS InSAR algorithm and the unwrapping phase based CR-InSAR algorithm, it proves that the improved method can obtain the nonlinear time series result accurately and also reveals that Jiaju landslide has obvious deformation characteristics reasonably.

Key words: Jiaju landslide; nonlinear deformation; monitoring; artificial corner reflectors

First author: AO Meng, PhD candidate, specializes in synthetic aperture radar interferometry. E-mail: aomeng317@163.com

Corresponding author: ZHANG Qin, PhD, professor. E-mail: zhangqinle@263.net.cn

Foundation support: The National Program on Key Basic Research Project (973 Program), No. 2014CB744703; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41372375, 41274005, 41304016, 41202245.