

海量时序地基 SAR 影像相干目标选取

黄其欢¹ 付五洲¹ 岳建平¹ 徐亚明²

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 南京, 210098; 2. 武汉大学测绘学院, 武汉, 430079)

摘要: 从序列 SAR 影像中选取全部有效的相干像元是提高 SAR 干涉变形监测空间密度和可靠性的重要保障。针对地基 SAR 的局域性、连续观测、数据量大、零基线干涉、相干性强和空间分辨率不一致等特点, 在研究其成像特点的基础上, 提出从海量时序地基 SAR 干涉图中提取相干目标的双阈值法, 利用隔河岩水利工程区域 1 330 幅地基 SAR 影像对该方法进行了检验, 实验结果证明该方法可有效提取可靠的相干像元, 并指出当地基 SAR 影像多于 600 幅时, 小于 0.3 的平均相干系数阈值对相干目标数量几乎没有影响, 而振幅离差指数阈值是影响地基 SAR 相干目标数量的主要因素。

关键词: 地基 SAR; 相干目标; 相干系数; 幅度离差指数; 变形监测

中图分类号: P2 **文献标志码:** A

Selection of Coherent Targets in Large Number of Time Series Ground Based SAR Images

Huang Qihuan¹ Fu Wuzhou¹ Yue Jianping¹ Xu Yaming²

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098, China;

2. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan, 430079, China)

Abstract: Among a large number of time series of SAR images, selection of all valid coherent targets can improve space density and guarantee reliability of SAR interferometry for deformation monitoring. Continuous observation of ground based SAR can get local area deformation day and night in all weather conditions, and has the characteristics of large amount of data, zero baseline interferometry, strong coherence and different spatial resolution. In this paper, based on the imaging characteristics, a double threshold method of extracting coherent targets from a large number time of series ground based of SAR images is proposed. The method is tested on Geheyan Water Conservancy project area with 1 330 ground based SAR images. Experiment results prove that the method can effectively extract reliable coherent pixels. Moreover, when the number of ground based SAR images is more than 600, less than 0.3 of average correlation coefficient threshold almost has no effect on coherent targets number, while the amplitude dispersion index threshold is the main factor of effecting the number of coherent targets in ground based SAR images.

Key words: ground based SAR; coherent target; correlation coefficient; amplitude dispersion index; deformation monitoring

引 言

地基 SAR 是在星载 SAR 基础上发展起来的,主要用于地表局部区域变形监测,具有全天时、全天候和连续获取局部区域高分辨率变形信息的优势,且设备安置灵活、操作方便^[1],地基 SAR 干涉变形监测技术是提取滑坡^[2-4]、冰川^[5]、矿山^[6]、桥梁^[7]和大坝^[8]等变形信息的有效方法,具有广泛的应用前景。地基 SAR 干涉变形监测数据处理的基本思想是在序列 SAR 影像中提取高质量的相干像元进行干涉处理,从干涉图像中分离出变形信息。地基 SAR 系统通常被安置在一滑轨上,利用步进频率连续波技术提高距离向分辨率,通过系统在滑轨上的滑动利用合成孔径技术提高方位向分辨率并获取监测区域二维影像。不同于脉冲雷达在极短的时间内发射大带宽的脉冲信号,地基 SAR 的步进频率雷达通过多脉冲相参合成处理来实现高距离分辨率,而其方位向分辨率与距离有关,距离越远,分辨率越低。地基 SAR 在数分钟内即可获取一幅影像,如图 1 所示。在连续干涉模式中,由于地基 SAR 影像一般获取时间间隔短,且为零基线干涉,影像的相干性较好,非常适合在较短的时间内变形体的应急监测。与星载 SAR 相似,为提高干涉效果、减少相位噪声^[9]对形变信息的影响,需要提取影像中辐射特性较为稳定的高相干目标进行相位分析。针对星载 SAR,相干目标的选取方法主要有相位分析法^[10]、相干系数法、幅度离差指数法^[11]以及这几种方法的组合而形成的多级探测法^[12-13],这些方法在星载 SAR 长时间序列变形监测相干目标的选取方面取得了较好的效果,为星载 SAR 干涉技术探测长时间缓慢地表面形变提供了重要保证。然而,地基 SAR 影像与星载 SAR 影像有诸多不同,如何从序列地基 SAR 影像中选取全部且有效的相干像元成为地基 SAR 干涉技术变形监测数据处理的关键。考虑到地基 SAR 时序影像数量多、干涉处理计算量大的特点,基于星载 SAR 相干目标多级探测思想^[12],提出地基 SAR 相干目标双阈值提取法,该方法利用地基 SAR 干涉处理的相干系数进行相干目标初选,同时考虑地基 SAR 空间分辨率的不一致性,采用振幅离差指数进一步对相干目标精选,从而从海量地基 SAR 影像中提取高相干像元。

本文在研究地基 SAR 成像特性的基础上,提出地基 SAR 双阈值法用于海量影像相干目标探测,最后用隔河岩水利工程区域的 1 330 幅地基 SAR 影像进行双阈值法相干目标提取实验,分析了阈值大小和影像数量对相干目标选取结果的影响。

1 双阈值法相干目标选取

1.1 相干系数阈值法初选

SAR 影像干涉相位噪声高低最直观且简单的衡量标准是相关系数,理论上,相干系数是定义在两个随机平稳序列 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 上的,然而 SAR 传感器并不能获得同一时刻的多次观测,在假设平稳过程 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 各态历经的基础上,利用大小为 L 的窗口空间平均代替汇集平均,以 $\hat{\gamma}$ 作为原始相干值 γ 的估计^[14],则

$$\hat{\gamma} = \frac{|\sum_{L=1}^L s_1(L) s_2^*(L)|}{\sqrt{\sum_{L=1}^L |s_1(L)|^2 \sum_{L=1}^L |s_2(L)|^2}} \quad (1)$$

在连续观测模式中若获取 $N+1$ 幅地基 SAR 影像,采用相邻干涉模式可获取 N 个干涉对,由式(1)可计算得各干涉对的相干系数 $\gamma_i, i=1, 2, \dots, N$, N 个干涉对的相关系数均值为

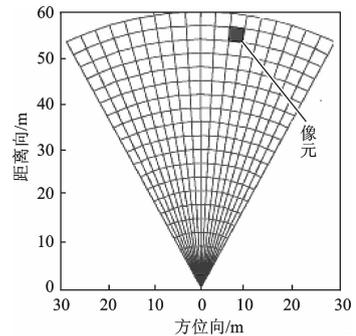


图 1 地基 SAR 成像示意图
Fig. 1 Sketch map of ground based SAR imaging

$$\bar{\gamma} = \sum_{i=1}^N \gamma_i \quad (2)$$

选取适当的阈值 $T_{\bar{\gamma}}$, 将大于该阈值的像元提取出作为相干目标初选结果。平均相干系数阈值初选的优点是仅需要 2 幅影像, 但选取的可靠性与漏选概率取决于平均相干系数阈值与窗口大小, 阈值越高, 选取的可靠性越高, 但漏选的可能性增大; 窗口越大, 相干系数越可靠, 但降低空间分辨率, 会导致孤立且有效的相干目标很难被检测出来, 靠近相干目标附近的非稳定目标也可能被错误地确定为相干点。一般利用相干系数阈值法选取的相干目标成块状分布, 而非单个独立的像元。设定适当的阈值 $T_{\bar{\gamma}}$ 可有效去除水体、植被等失相干严重的像元, 减少后续步骤计算量, 提高计算效率。

1.2 振幅离差指数阈值精选

研究表明^[11], 在高信噪比像元上, 振幅离差指数可用来衡量相位的噪声水平 σ_v , 幅度离差指数法基于相位噪声和振幅离差指数的这种统计特性, 在时间序列影像中求取每个像元的振幅均值 m_A 及标准差 σ_A , 计算振幅离差指数为

$$D_A = \frac{\sigma_A}{m_A} \quad (3)$$

当振幅离差指数 D_A 小于给定的阈值 T_D 时, 该像元即被选定为相干像元。振幅离差指数法仅利用地基 SAR 影像的振幅信息, 计算简单、效率高、无分辨率损失且大量地基 SAR 影像正好满足振幅离差指数要求的干涉时间序列上的统计意义。另外, 在计算振幅离差指数前, 连续采集的地基 SAR 影像无需进行配准和统一的辐射校正, 减少了数据处理步骤并大大减少了计算工作量。

2 相干目标选取实验与分析

2.1 研究区域

选取隔河岩水利工程变形监测采集地基 SAR 影像进行相干目标选取实验, 实验影像由 IBIS-L 系统的连续测量模式获取, 参数见表 1, 数据采集范围方位向为 $-45^\circ \sim +45^\circ$, 共计获取地基 SAR 影像 1 330 景。地基 SAR 原始影像经聚焦处理后, 形成 2 600 行 \times 401 列的 SAR 影像, 考虑到方位向分辨率与距离有关, 需将原影像用极坐标表示, 图 2 为数据采集现场, 图 3 为获取的地基 SAR 能量图均值, 其中白色区域为研究区域。从图 2 可以清晰地解译出大坝坝体(图 2A 处)及右岸电站和边坡阶梯(图 2B 处), 左岸的 2 级升船机及中间错船渠(图 2C 处)亦能清楚地看出, 特别地, 位于大坝下游的排洪消能水泥墩(图 2D 处)反射信号明显, 甚至可以看出水泥墩的数量。

表 1 隔河岩地基 SAR 变形监测数据采集信息

Tab. 1 Information of ground based SAR data collection for deformation monitoring at Geheyan

天线增益/dB	20	合成孔径长度/m	2
信号频段	Ku	距离向/m	0.5
波长/cm	1.78	方位向分辨率/(m · rad)	4.4
信号带宽/GHz	1.705~1.735	最大监测距离/m	1 300
步进频率/kHz	57.703	单景影像采集平均时长/min	5.38

2.2 相干目标初选

考虑到相干系数窗口大小对相干性的影响, 采用不同的窗口计算相干系数, 图 4 显示平均相干系数阈值为 $T_{\bar{\gamma}} = 0.3$ 时不同窗口大小获取的相干目标情况。从图 4(a)可以看出, 虽然相干系数阈值相对文献^[12]中的 0.15 已提高一倍, 但水面和植被覆盖茂盛区域仍然存在较多零星分布的相干目标, 这说明较小窗口计算的相干目标可靠性低, 不能有效去除水域和植被覆盖区域的失相干目标; 图 4(b)的相干

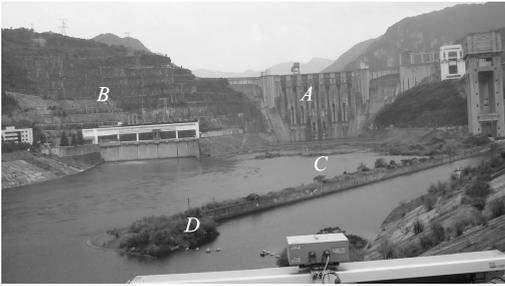


图 2 IBIS-L 数据采集场景

Fig. 2 Scene of IBIS-L data collecting

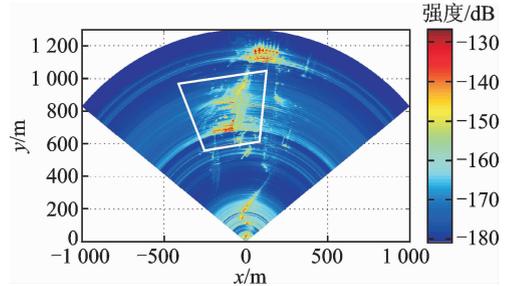


图 3 地基 SAR 能量图

Fig. 3 Amplitude of ground based SAR image

目标主要分布在边坡、堤坝、河流裸露岩石以及建筑物区域,水域和大量植被等失相干区域的像元去除效果良好,这说明较大窗口计算的相干系数可靠性高,但选取的相干目标成块状分布,特别是边坡阶梯之间大量植被覆盖的带状区域也被错误地选择成相干目标。

2.3 振幅离差指数精选和相干目标数量分析

在相干系数阈值初选的基础上,利用 1 330 幅影像计算各相干目标像元的振幅离差指数,设定阈值 $T_D = 0.25$ 进行相干目标精选,得到研究区域相干目标分布如图 5 所示。从图 5 可以看出,相干目标主要分布在水泥构成的建筑物以及堤岸、裸露的岩石等区域,结合边坡阶梯、堤岸及排洪消能水泥墩的分布可以看出,两者一致性较好,证明了选取的相干目标合理可靠。但图 5 中标记的圆形区域是水轮发电机将重力势能转化为电能后不断由下向上涌动的水体,该区域被误选为相干目标可能与此处水体明显高于周围水面有关。

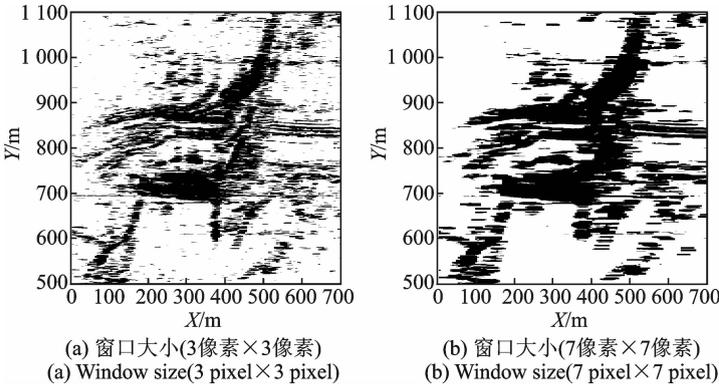


图 4 窗口大小对相干目标提取结果的影响

Fig. 4 Impact of window sizes on coherent targets

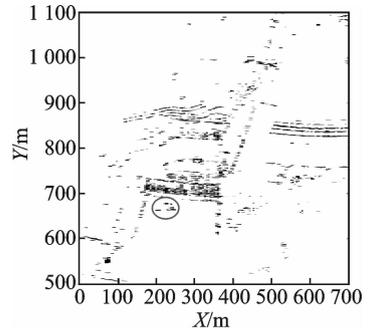


图 5 相干目标分布图

Fig. 5 Distribution of coherent targets

研究区域相干目标的数量与平均相干系数阈值、振幅离差指数阈值以及影像数量密切相关。图 6 为研究区域 1 330 影像得到的相干目标数量与平均相干系数以及振幅离差指数之间的关系,可以看出,平均相干系数小于 0.3 时相干目标的数量几乎不变,而随着平均相干系数的增加,相干目标数量急剧减小;随着振幅离差指数从 0.2 增加到 0.35,相干目标的数量从 1 500 个增加到 6 000 个左右,因此,振幅离差指数是影响相干目标数量的关键因素。图 7 显示了 $T_D = 0.25$ 时相干目标数量与平均相干系数以及地基 SAR 影像数量的关系,从图 7 中可以看出:(1)相干目标随着平均相干系数以及影像数量的增加不断减少;(2)随着地基 SAR 影像数据量的增加,相干目标的个数逐渐减少,当地基 SAR 影像数量多于 600 幅时,相干目标数量趋于稳定;(3)在地基 SAR 影像多于 600 幅时,选取平均相干系数阈值为 0.3~

0.35 时,既可以保证相干目标的数量,也可以保证其质量。

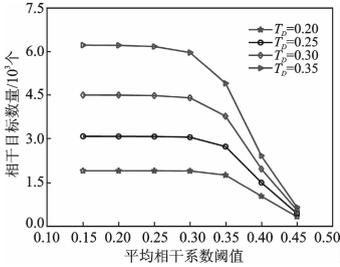


图 6 相干目标数量与平均相干系数与振幅离差指数阈值关系

Fig. 6 Relationship of targets number, average coefficient and amplitude dispersion index

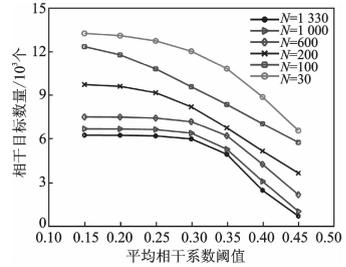


图 7 相干目标数量与平均相干系数阈值及影像数量关系

Fig. 7 Relationship of targets number, average coefficient and SAR images

3 结论

利用连续干涉模式获取海量地基 SAR 时序干涉图,采用平均相干系数阈值法进行相干目标初选,再利用地基 SAR 影像振幅离差指数进行精选,从海量地基 SAR 干涉图序列中提取相位稳定的相干目标。利用隔河岩水利工程区域获取的 1 330 幅地基 SAR 影像生成的时序干涉图进行了相干目标提取实验,并分析了相干目标数量与平均相干系数阈值、振幅离差指数以及地基 SAR 影像数量之间的关系,总结出的结论如下:

(1)选取适当窗口计算相干系数,利用平均相干系数阈值法可有效去除失相干严重的水域及植被覆盖区域,获取相干目标候选点,缩小相干目标搜索的范围。(2)振幅离差指数阈值法基于单个像元的时序振幅信息进行统计分析,无空间分辨率损失,且不受领域噪声的干扰。(3)隔河岩水利工程实验区域双阈值法提取的相干目标主要分布于边坡岩石、堤坝、发电厂以及河滩裸露岩石,证明该方法提取的相干目标是可靠的。(4)双阈值法分别利用平均相干系数阈值和振幅离差指数阈值进行初选和精选,计算量小、计算速度快。(5)相干目标的数量与平均相干系数阈值、影像数量以及振幅离差指数阈值有关。相干目标的数量随着振幅离差指数的增加成倍增加,随着影像数量的增加而减少,在隔河岩实验中,当影像多于 600 幅后影像数量的增加对相干目标数量影响较小。(6)地基 SAR 影像相干性较好,当平均相干系数阈值小于 0.3 时对相干目标的数量几乎没有影响,随着平均相干系数的增加,相干目标数量急剧减小。

需要指出的是,振幅离差指数阈值对地基 SAR 相干目标选取的数量影响很大,本文采用星载 SAR 相干目标选取时通常采用的 0.25 进行计算,需要进一步研究地基 SAR 相位标准差、振幅离差指数与噪声标准差之间的统计特性以对振幅离差指数阈值进行优化选取。

致 谢

感谢武汉大学测绘学院提供 IBIS-L 型地基 SAR 系统,感谢武汉大学王鹏、周校以及河海大学董杰为数据采集付出的辛勤劳动,特别感谢湖北清江水电开发有限责任公司库坝中心贡建兵为现场数据采集提供方便。

参考文献:

- [1] 黄其欢,张理想. 基于 GBInSAR 技术的微变形监测系统及其在大坝变形监测中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2011,31(3):84-87.
Huang Qihuan, Zhang Lixiang. Ground based synthetic aperture radar interferometry and its application to deformation monitoring [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011,31(3):84-87.
- [2] Noferini L, Pieraccini M, Mecatti D, et al. Using GB-SAR technique to monitor slow moving landslide [J]. Engineering Geology, 2007,95:88-98.
- [3] Del V E, Intrieri G, Luzi N, et al. Using ground based radar interferometry during emergency: The case of the A3

- motorway (Calabria Region, Italy) threatened by a landslide [J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2011, 11:2483-2495.
- [4] Del V C, Casagli N, Fortuny-Guasch J, et al. Activity in relation to rainfall by means of GBInSAR monitoring [J]. *Landslides*, 2012, 9:497-509.
- [5] Luzi G, Pieraccini M, Mecatti D, et al. Monitoring of an alpine glacier by means of ground-based SAR interferometry [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4:495-99.
- [6] 杨红磊, 彭军还, 崔洪曜. GB-InSAR 监测大型露天矿边坡变形[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(4):1804-1811.
- Yang Honglei, Peng Junhuan, Cui Hongyao. Slope of large-scale open-pit mine monitoring deformations by using ground based interferometry[J]. *Progress in Geophys*, 2012, 27(4):1804-1811.
- [7] 徐亚明, 王鹏, 周校, 等. 地基干涉雷达 IBIS-S 桥梁动态形变监测研究[J]. *武汉大学学报*, 2013, 38(7):845-849.
- Xu Yaming, Wang Peng, Zhou Xiao, et al. Research on dynamic deformation monitoring of bridges using ground-base interferometry radar IBIS-S[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(7):845-849.
- [8] Tarchi D, Rudolf H, Luzi G, et al. SAR interferometry for structural changes detection: A demonstration test on a dam [C] // *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. [S. l.]: IEEE, 1999:1522-1524.
- [9] 朱良, 禹卫东, 郭巍. 星载 SAR 的噪声干扰分析[J]. *数据采集与处理*, 2011, 26(3):314-316.
- Zhu Liang, Yu Weidong, Guo Wei. Noise jamming analysis of spaceborne synthetic aperture rada [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2011, 26(3): 314-316.
- [10] 王艳, 廖明生, 李德仁, 等. 利用长时间序列相干目标获取地面沉降场[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(2):598-604.
- Wang Yan, Liao Mingsheng, Li Deren, et al. Subsidence velocity retrieval from long-term coherent targets in radar interferometric stacks [J]. *Chinese J Geophys*, 2007, 50(2):598-604.
- [11] Ferretti A P, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8219.
- [12] 陈强, 刘国祥, 李永树, 等. 干涉雷达永久散射体自动探测—算法与实验结果[J]. *测绘学报*, 2006, 35(2):112-117.
- Chen Qiang, Liu Guoxiang, Li Yongshu, et al. Automated detection of permanent scatterers in radar interferometry: algorithm and testing results[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2006, 35(2):112-117.
- [13] 卢丽君, 廖明生, 王腾, 等. 一种在长时间序列 SAR 影像上提取稳定目标点的多级探测法 [J]. *遥感学报*, 2008, 12(4): 561-567.
- Lu Lijun, Liao Mingsheng, Wang Teng, et al. A multi-step detection method for extraction of stable pointwise target in long temporal SAR image series[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(4):561-567.
- [14] Touzi R, Lopes A, Bruniquel J, et al. Coherence estimation for SAR imagery [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1999, 37:135-149.

作者简介:



黄其欢 (1978-), 男, 副教授, 博士, 研究方向: InSAR 理论与应用, E-mail: InSAR@hhu.edu.cn.



付五洲 (1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 地基 SAR 变形监测数据处理。



岳建平 (1963-), 男, 教授, 研究方向: 变形监测理论与方法。



徐亚明 (1964-), 男, 教授, 研究方向: 精密工程测量和数字近景摄影测量。

