第29卷,第1期 2017年03月

doi: 10.6046/gtzyyg.2017.01.01

引用格式: 刘斌,葛大庆,李曼,等. 地基合成孔径雷达干涉测量技术及其应用[J]. 国土资源遥感,2017,29(1):1-6. (Liu B, Ge D Q, Li M, et al. Ground - based interferometric synthetic aperture radar and its applications[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2017,29(1):1-6.)

地基合成孔径雷达干涉测量技术及其应用

刘 斌¹, 葛大庆¹, 李 曼¹, 张 玲¹, 王 艳¹, 郭小方¹, 张晓博²

(1. 中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083;

2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083)

摘要:在简要讨论地基合成孔径雷达干涉测量(ground – based interferometric synthetic aperture radar, CB InSAR)技术原理的基础上,归纳了常规地基 InSAR 形变测量的主要处理流程。全面总结了地基干涉测量雷达系统的主要类型及其发展趋势,地基 InSAR 技术的主要应用领域以及目前存在的问题,对比分析了地基和星载 InSAR 在形变测量上的优势和不足。

关键词: 地基合成孔径雷达干涉测量; 步进频率连续波; 调频连续波; 噪声雷达; 多人多出技术 **中图法分类号:** TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001 - 070X(2017)01 - 0001 - 06

0 引言

星载干涉测量雷达系统的优势为覆盖范围广、 监测精度可靠,能以较高频率和密度获取观测区的 变形状况,适用于具有一定空间尺度的形变场连续 监测。针对地面多类型、多尺度形变测量的监测技 术需求,星载雷达系统仍然存在如下缺点:①观测 实时性受制于卫星重访周期,难以满足动态和应急 监测需要;②雷达入射角由于卫星飞行方向固定 (升轨或降轨),且单一,边坡观测存在叠掩、阴影和 顶底倒置等现象,难以满足边坡监测等观测需要; ③进行山体滑坡、矿山边坡失稳、冰川运动等局部变 形监测时,星载干涉测量雷达系统的空间分辨率、覆 盖范围往往难以达到最佳匹配。

地基干涉测量雷达系统是利用布设在监测对象 附近的地面雷达测量系统,实现对被观测对象的近 实时动态连续监测。由于采用的雷达波长更短,因 此测量精度能达到毫米一亚毫米级,能够根据观测 目标形变场的演化特征灵活安置,弥补星载雷达重 访周期固定、人射角度单一等不足。

本文在详细讨论地基合成孔径雷达干涉测量 (ground - based interferometric synthetic aperture radar, GB InSAR)技术原理的基础上,归纳常规 GB InSAR 形变测量的主要处理流程,并通过总结地基干 涉测量雷达系统的发展现状,以及 GB InSAR 技术 的应用领域,对比分析地基和星载 InSAR 在形变测 量上的优势和不足,全面掌握地基干涉测量雷达系 统的实用能力。

1 GB InSAR 技术原理

一般来说,地基雷达观测期间的空间基线为0, 因此地形相位为0。为了确定地形相位,2次扫描过 程中,垂直移动传感器的位置可以产生空间基线。 如图1(据文献[1]修改)所示,轻微平移滑轨,使得



收稿日期: 2015-07-22; 修订日期: 2015-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目"基于改进的高分辨率时序 InSAR 技术研究 Khash Mw7.7 地震震后形变机制"(编号:41504048)和 中国地质调查局计划项目"地基雷达干涉测量系统与边坡稳定性监测示范"(编号:12120114036401)共同资助。 第一作者:刘斌(1982-),男,博士,主要从事星载和地基 InSAR 技术理论与应用研究。Email: lbin0226@163.com。

2 次观测过程中雷达传感器的位置发生变化($M_1 \rightarrow M_2$), 将 2 次观测获得的复数影像共轭相乘,那么得到的 干涉相位中就会包含观测区域的地形相位。观测相 位与地形的关系可以表示为

 $R_2 = R_1 + \Delta \varphi_{21} \frac{4\pi}{\lambda} , \qquad (1)$

根据图1中的几何关系,式(1)可以写为

$$\Delta \varphi_{21} = \frac{4\pi}{\lambda} (R_2 - R_1) = \frac{4\pi}{\lambda} [\sqrt{R_1^2 - 2hb + b^2} - R_1] , \qquad (2)$$

式中: *R*₁ 和 *R*₂ 分别为第 1 次和第 2 次测量距离; λ 为波长; *b* 为 *M*₁ 和 *M*₂ 之间的距离(空间基线); *h* 为目标点的高程。假定(*b*/*R*) <<1,且 *R*₁ - *R*₂ << *R*₁,式(2)可近似简化为

$$h = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{R_1}{b} \Delta \varphi_{21} \quad . \tag{3}$$

如果 M₂ 位于 M'₂ 位置,空间基线 b 不在垂直方 向上,而产生了基线夹角β,那么需要进行进一步校 正,即

$$\hat{h} = h\cos\beta + \sqrt{R_1^2 - h^2}\sin\beta$$
, (4)

式中h为校正后的高程估计量。

按照基线的类型,干涉相位 $\Delta \varphi_{21}$ 主要分为4部分,即



图 2 地基 InSAR 形变测量数据处理流程(据文献[2]修改) Fig. 2 Displacement process flow of GB InSAR

1) GB InSAR 影像配准。影像配准是 GB InSAR 形变测量的关键步骤之一,是将 2 景影像中代表相 同地物的像元匹配到同一位置。影像配准的步骤主 要分为影像匹配、仿射变换和影像重采样等 3 步。 如果影像间的像元位置没有发生较大变动,一般来 说,配准过程能够高度自动化完成。地基雷达对同 一目标区域进行重复观测时,由于观测平台的微小 偏移会使地基雷达观测轨道和观测视角发生微小改 变,造成影像在距离向和方位向发生一定的错位和 扭曲,因此,非连续模式观测必须进行影像配准。而 连续模式观测时由于轨道固定不动,GB InSAR 通常 式中: φ_{topo} 为空间基线引起的地形相位; φ_{disp} 和 φ_{atm} 为形变和大气影响产生的时间相位变化; φ_{noise} 为噪 声;n为整周模糊数。式(5)左侧为观测干涉相位, 而右侧含有未知参数。为了求解地形相位,式(5) 可写成

$$\varphi_{\text{topo}} = \Delta \varphi_{21} - \varphi_{\text{disp}} - \varphi_{\text{atm}} - \varphi_{\text{noise}} + 2\pi n_{\circ} \quad (6)$$

2 次扫描期间垂直移动传感器的位置可以产生 空间基线 B_s ,由于存在时间基线 B_t ,这样时间基线 相关分量仍是方程的一部分。采用2个具有一定距 离的垂向分布的天线同时接收信号,可以大大简化 方程的计算,然后估计函数模型中的时间基线相关 分量 φ_{disp} 和 φ_{atm} 。

对于地基雷达形变监测,假定空间基线为0, φ_{disn} 可以写为

$$\varphi_{\rm disp} = \Delta \varphi_{21} - \varphi_{\rm atm} - \varphi_{\rm noise} + 2\pi n \, \, _{\circ} \qquad (7)$$

假设采样时间间隔为△t,为了避免相位模糊,目标 点的线性形变速率v必须满足 $|v| < \frac{\lambda}{4 \land t}$ 。

2 常规 GB InSAR 形变测量处理流程

GB InSAR 形变测量数据处理与星载 InSAR 类似,但其处理流程相对更为复杂。GB InSAR 形变测量处理主要流程如图2所示(据文献[2]修改)。

无需进行影像配准。但对于长距离观测并且观测时间较长的情况,由于某些影像获取期间大气的变化 使得影像发生畸变,因此部分影像也应进行校正补 偿^[3]。

2)GB InSAR 干涉图和相干图生成。将配准后的干涉像对共轭相乘得到干涉图 z₁z₂*,并根据式 (8)计算得到相应的相干图 γ,即

$$|\hat{\gamma}| = \left| \frac{\sum_{i=1}^{n} (z_{1}z_{2}^{*})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} |z_{1}|^{2} \sum_{i=1}^{n} |z_{2}|^{2}}} \right| \circ (8)$$

由于连续模式观测的空间基线为0,因此无需进行 地形相位补偿;非连续模式观测的空间基线不为0, 引入额外的地形相位时需要将干涉图中的地形相位 消除。

3)相位解缠。相位解缠是干涉相位主值恢复 至真实相位值的过程,是 GB InSAR 形变测量的重 要环节之一。目前的相位解缠算法通常需满足

$$| \varphi_{\text{disp}_{\Delta t}}(i,j) - \varphi_{\text{disp}_{\Delta t}}(k,l) | < \frac{\lambda}{4}$$
, (9)

式中: (i,j)和(k,l)表示相邻像元位置; $\varphi_{disp_{\Delta t}}$ 为干 涉像对获取时间间隔 Δt 内发生的缠绕形变相位。 连续模式数据采集时间短,目标的形变速率在2景 GB InSAR 影像获取的时间间隔 Δt 内,一般能够满 足 $|v| < \frac{\lambda}{4\Delta t}$,因此无需进行相位解缠;对于大多数 非连续模式观测,由于存在多种失相干因素, φ_{noise} 将 影响相位解缠的准确性。

4)大气相位校正。解缠相位中包括形变相位、 大气相位和噪声。噪声可以通过空间低通滤波削 弱,大气相位主要有3种方法予以消除:①利用气 象观测数据(温度、湿度和压力)确定大气相位;② 通过稳定点(地面控制点)估计大气相位;③空间插 值或滤波。

5)地理编码。为了解译观测数据以及与其他 观测数据进行对比分析,需要将雷达坐标系中的结 果投影到地理坐标系下,即获得主影像每一像元的 三维位置矢量。

3 地基干涉测量雷达系统发展和应用

3.1 发展现状

地基干涉测量雷达系统目前多采用 Ku 波段雷 达波,主要包括雷达传感器、能量供应单元、数据采 集和存储单元以及数据处理模块等。按照成像方式 的不同可分为2 大类:真实孔径雷达(real aperture radar,RAR)和合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)。商用型地基干涉测量雷达系统主要有: IBIS 系列地基雷达系统(IDS,意大利)^[4]、GPRI 便 携式雷达干涉仪(GAMMA,瑞士)^[5]、FastGBSAR 系 统(MetaSensing,荷兰)^[6]、ARAMIS 系统(AR-ELECS,意大利)^[7]、SSR 系统(GroundProbe,澳大利 亚)^[8]和 S - SAR 系统(中国安全生产科学研究 院)^[9];典型的科研型包括:LiSA^[10]和 MELISSA^[11] 系统(JRC,欧盟委员会)、RiskSAR 系统^[12](UPC,西 班牙)、GB NW - SAR 系统^[13](IRPHE,乌克兰)、 ARCSAR 系统^[14](KNU,韩国)、ASTRO 系统^[15](中 国科学院电子学研究所,中国)和超宽带轨道 SAR 系统^[16](国防科技大学,中国)。其中,GPRI 便携式 雷达干涉仪和 SSR 地基干涉测量雷达系统属于真 实孔径雷达范畴。

按照雷达的工作体制划分主要包括:步进频率 连续波 (stepped frequency continuous wave, SF-CW)^[4,9,10,12,16]、调频连续波(frequency modulation continuous wave, FMCW)^[5-7]、噪声雷达^[13-14]以及 多入多出技术 (multiple input multiple output, MI-MO)^[11,15]等雷达系统。地基干涉测量雷达系统研 制初期,由于矢量网络分析仪(vectorial network analyzer, VNA)无需复杂的电子元器件,便可产生类似 于 SFCW 的电磁波,一些地基雷达传感器(如 IBIS 和 LiSA)的核心通常采用 VNA 产生带通信号、检波 和模拟数字转换。基于 VNA 的地基雷达系统是以 连续波的形式发射离散的频率分量,然后在时间域 内重建电磁脉冲的波形合成一个等效脉冲,因此单 景影像的采集时间较长(最短几 min)。较长的扫描 时间增加了大气扰动的可能性,同时由于扫描期间 观测目标的不稳定也可能会导致影像幅度和相位的 失真^[17]。近几年来,科研人员开始利用 FMCW 雷 达(如 FastGBSAR、ARAMIS)取代 VNA, FMCW 雷 达,这不但可以提高设备的可操作性,而且能够减少 数据采集时间(几 s-几十 s),降低观测成本。此 外,研究人员还将噪声雷达(如 GB NW - SAR)和多 入多出技术(如 MELISSA)应用于地基雷达系统以 获得更快的数据采集时间,如 MELISSA 系统最短采 集时间仅为 0.26 s。相对于真实孔径雷达, 合成孔 径雷达通过沿较长的轨道运动以获得较大的孔径, 目前除了几种最新的系统采用弧形扫描(如 GB NW -SAR)以及无运动扫描(如 MELISSA)外,雷达传感 器沿线性轨道滑动扫描是最常用的扫描方式。

3.2 应用领域

GB InSAR 技术按照数据获取方式的不同分为 连续模式(continuous ground - based interferometric synthetic aperture radar, C - GB InSAR)和非连续模 式(dis - continuous ground - based interferometric synthetic aperture radar, D - GB InSAR)2类^[18]。连 续模式观测通常将设备安装在观测现场,根据需要 合理配置雷达参数,长时间持续采集数据(如每隔 几分钟采集一次),这种模式允许用户采用"近似实 时"监测目标区,适宜观测快速形变现象(如每天几 cm)。由于设备安装在固定观测站,因此空间基线 和地形相位皆为0。非连续模式观测通常需在观测 区建立固定观测站,根据形变的运动学特征设置一 定的观测周期,定期观测获取数据(如以周、月或年 为周期),非连续模式一般用来观测缓慢变形现象。 连续模式和非连续模式2种类型的 GB InSAR 数据 处理策略基本相同,但非连续模式往往面临2个难 点:时间失相干和相位混叠现象,观测点密度、监测 精度以及形变测量的可靠性有所降低。

目前 GB InSAR 已在多个领域得到了广泛应 用,如露天采矿边坡^[19]、滑坡^[20]、崩塌^[21]、火山^[22]、 单体建(构)筑物^[23]、水坝/堤坝^[24]、冰川^[25]等地物 的变形测量。其中,GB InSAR 在露天采矿边坡稳定 性、水坝/堤坝形变、单体建(构)筑物结构变形等领 域的应用最为广泛和成熟。由于这些目标物适宜于 雷达波反射,GB InSAR 获得的相干目标数量多,其 信噪比、相干系数和相位稳定性都较高,能够探测到 观测目标的局部微小变形,为工程施工提供早期预 警。对于单体建(构)筑物的结构变形监测,关键是 对每一观测像元进行精确的地理编码,而地理编码 精度取决于所用的 DEM 质量。因此,通常采用激光 雷达获取精确的地形数据,或者利用 GB InSAR 得 到同一区域的 DEM,但后者得到的 DEM 一般来说 远不如激光雷达结果可靠。与露天采矿边坡监测相 比,崩塌、山体滑坡和火山等地质灾害涉及到边坡稳 定性监测,多数情况下观测区域植被较为茂密,不利 于雷达回波信号的接收,这些观测区域的相干目标 相对稀少,有的区域甚至无法获得相干目标,但提取 的相干目标的测量精度依然可以达到毫米一亚毫米 级。GB InSAR 远距离、高时空采样能力,也为冰川 运动提供了一种新型监测工具,利用 GB InSAR 观 测冰川的应用限制主要归结于失相干问题:一方面 由于冰川存在积雪覆盖,不利于雷达波反射,观测期 间如遇降雪也会影响观测效果;另一方面对于 SFCW 地基雷达系统的单景数据采集时间较长,相 对于冰川局部的移动速度,几 min 采集时间内冰川 局部已发生明显变化。因此,对于移动较快的冰川 监测适宜采用连续模式观测。

从数据处理层面上讲,大多数 GB InSAR 系统 采用 Ku 波段雷达系统,这类系统的硬件性能易于 实现,可以获得高空间分辨率影像,而且 Ku 波段对 地物的微小变化比较敏感。但温度、湿度等外界观 测条件的变化都可能会引起观测目标的微小形变, Ku 波段的这种高形变敏感度也会带来数据处理上 的额外负担,在数据处理过程中,如何消除环境变化 引起的目标微小形变的影响至关重要^[16]。GB In-SAR 在 2 次数据采集间隔大气条件的差异会产生额 外的相位贡献也不容忽视,研究人员已提出多种大 气模型改进数据处理流程^[12,16-17],然而这些大气校 正模型均是基于均一大气介质模型的假设,对于非 均一大气的影响,目前还没有一种可靠的方案消除 大气相位影响。另外,波长越短失相干越严重,影像 失相干可能会使相位产生混叠现象,增加了相位解 缠的难度。在观测区域的某些部位,采用连续观测 模式观测失相干现象相对容易控制,如果采用非连 续观测模式,这种失相干现象更为明显。为了提高 相干性,一种较为有效的方法就是采用较短的滑轨, 但这种做法势必会降低观测精度和空间分辨率。

3.3 地基与星载 InSAR 形变测量比较

1)零空间基线。地基雷达系统可以完全控制 空间基线。对于连续观测模式形变监测来说,空间 基线为0,零空间基线干涉测量无需 DEM 参与,因 此它是最理想的干涉测量形变获取方式。

2)轨道控制。由于观测设备位置固定,因此干 涉测量处理没有轨道误差。

3)时间采样率。地基雷达系统的最短数据采 集间隔在亚 s 到几 min 之间,而星载雷达的重访周 期通常为几 d—几十 d。高时间采样率在很大程度 上简化了相位解缠,甚至无需进行相位解缠。

4)入射角。根据监测目标的形变特征差异,星 载雷达和地基雷达各有自己的优势:对于地面沉降 观测,星载雷达具有最佳视角;而地基雷达更适合 陡坡形变观测。

5)观测范围。星载雷达可以监测大范围区域, 而地基雷达只能监测几 km² 的区域。

6)测量精度。地基和星载 InSAR 的观测精度 都取决于目标的散射特征以及与参考点的距离。 GB InSAR 的观测精度往往与设备和目标间的距离 有关,由于波长更短(如 Ku 波段),监测精度一般在 亚 mm 到几个 mm 之间。

4 结论

本文简要讨论了地基合成孔径雷达干涉测量技 术原理,归纳了常规地基 InSAR 形变测量的主要处 理流程;系统总结了地基干涉测量雷达系统的主要 类型、发展趋势及地基合成孔径雷达干涉测量技术 的主要应用领域,比较了地基和星载 InSAR 在形变 测量上的优势和不足。

1)地基干涉测量雷达系统经过十几 a 的研发, 核心传感器从原来的 SFCW 雷达发展到目前的 FM-CW 雷达、噪声雷达、MIMO 技术与 FMCW 雷达耦合 技术,数据采集频率由原来的几分钟缩短为几秒钟, 甚至亚秒级,二维成像观测由"近似动态"发展到了 动态观测目标区的变形过程。设备可操作性和稳定 性越来越高,能在恶劣工作情况下持续观测; 观测 方式更加灵活,可根据研究区形变特征自由设计最 佳观测方案,能从多个角度观测和分析目标区的运 动特征;数据处理简单快速,能在十几分钟内处理 完几天的观测数据;监测精度更高,观测目标的微 小变化在地基雷达测量结果中均有所反映。

2) 地基合成孔径雷达干涉测量技术应用涵盖 了露天采矿边坡、崩塌、山体滑坡、火山、桥梁等结构 变形、坝体变形、冰川运动、区域数字高程模型 (DEM)等十几个领域,尤其是在露天边坡稳定性监 测领域技术成熟,能探测到边坡的局部极其微小的 变形,为工程施工提供早期预警。

3)相位解缠仍然是制约地基合成孔径雷达干 涉测量技术的主要因素。由于采用短波长雷达波, 增加了相位解缠的难度。新型雷达传感器的应用能 够有效提高数据采样率,通过缩短数据采集时间间 隔以降低形变梯度,从而可以提高相位解缠的准确 度。另外,大气相位校正也是数据处理的一个难点, 目前尚无可靠的大气校正模型消除大气相位影响。

参考文献(References):

- [1] Monserrat Hernández O. Deformation Measurement and Monitoring with Ground – based SAR [D]. Barcelona; Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.
- [2] Rödelsperger S. Real time Processing of Ground Based Synthetic Aperture Radar (GB – SAR) Measurements [D]. Hessen: Technische Universität Darmstadt, 2011.
- [3] Martínez Vazquez A, Fortuny Guasch J. A GB SAR processor for snow avalanche identification [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(11): 3948 - 3956.
- [4] IDS Corporation. Interferometric radar (IBIS) technical papers [EB/OL]. https://www.idscorporation.com/georadar/more – information/technical – papers.
- [5] GAMMA Corporation. GAMMA Portable Radar Interferometer [EB/ OL]. http://www.gamma - rs. ch/rud/microwave - hardware/ gpri. html.
- [6] Rödelsperger S, Coccia A, Vicente D, et al. Introduction to the new metasensing ground – based SAR: Technical description and data analysis[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Munich, Germany: IEEE, 2012:4790 – 4792.
- [7] ARELECS Corporation. ARAMIS applications [EB/OL]. http:// www.arelecs.com/wordpress/? page_id = 166.
- [8] Groundprobe Corporation. Products and services [EB/OL]. http:// www.groundprobe.com/products - and - services.
- [9] 赵东寅,申其鸿,马海涛,等.国产地基合成孔径雷达监测预警 系统在紫金山金铜矿露天采场边坡位移监测的应用[J].中国 安全生产科学技术,2015,11(4):54-58.

Zhao D Y, Shen Q H, Ma H T, et al. Application of domestic ground based synthetic aperture radar monitoring and warning system in slope displacement monitoring on open pit of Zijinshan gold/copper mine[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015,11(4):54-58.

- [10] Martínez Vázquez A. Snow Cover Monitoring Techniques with GB -SAR[D]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2008.
- [11] Broussolle J, Kyovtorov V, Basso M, et al. MELISSA, a new class of ground based InSAR system. An example of application in support to the Costa Concordia emergency [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 91:50 - 58.
- [12] Iglesias González R. Orbital and Ground based Differential SAR Interferometry for the Monitoring of Slow – Moving Landslides [D]. Barcelona ; Universitat Politècnica de Catalunya , 2013.
- [13] Lukin K, Mogyla A, Palamarchuk V, et al. Monitoring of St. Sophia Cathedral interior using Ka – band ground based noise waveform SAR[C]//Proceedings of the European 6th Radar Conference. Rome, Italy: IEEE, 2009:215 - 217.
- [14] Lee H, Lee J H, Kim K E, et al. Development of a truck mounted arc - scanning synthetic aperture radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(5):2773 - 2779.
- [15] 曲世勃,王彦平,谭维贤,等. 地基 SAR 形变监测误差分析与实验[J]. 电子与信息学报,2011,33(1):1-7.
 Qu S B, Wang Y P, Tan W X, et al. Deformation detection error analysis and experiment using ground based SAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2011,33(1):1-7.
- [16] 张 祥,陆必应,宋 千. 地基 SAR 差分干涉测量大气扰动误差 校正[J]. 雷达科学与技术,2011,9(6):502-506,512.
 Zhang X,Lu B Y,Song Q. Atmospheric disturbance correction in ground - based SAR differential interferometry[J]. Radar Science and Technology,2011,9(6):502-506,512.
- [17] Lglesias R, Fabregas X, Aguasca A, et al. Atmospheric phase screen compensation in ground – based sar with a multiple – regression model over mountainous regions [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(5):2436-2449.
- [18] Monserrat O, Crosetto M, Luzi G. A review of ground based SAR interferometry for deformation measurement [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 93:40-48.
- [19] 杨红磊,彭军还,崔洪曜.GB InSAR 监测大型露天矿边坡形 变[J].地球物理学进展,2012,27(4):1804 1811.
 Yang H L, Peng J H, Cui H Y. Slope of large scale open pit mine monitoring deformations by using ground based interferometry[J]. Progress in Geophysics,2012,27(4):1804 1811.
- [20] Del Ventisette C, Casagli N, Fortuny Guasch J, et al. Ruinon landslide(Valfurva, Italy) activity in relation to rainfall by means of GB InSAR monitoring[J]. Landslides, 2012, 9(4):497-509.
- [21] Gischig V, Loew S, Kos A, et al. Identification of active release planes using ground – based differential InSAR at the Randa rock slope instability, Switzerland [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2009,9(6):2027 - 2038.
- [22] Nolesini T, Di Traglia F, Del Ventisette C, et al. Deformations and slope instability on Stromboli volcano: Integration of GBInSAR data and analog modeling[J]. Geomorphology, 2013, 180 - 181:242 -254.
- [23] Pieraccini M. Monitoring of civil infrastructures by interferometric radar: A review [J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013: 786961.
- [24] Mao W J, Chang W L. Deformation monitoring by ground based SAR interferometry(GB - InSAR): A field test in dam[J]. Ad-

vances in Information Sciences and Service Sciences, 2015, 7(2): 133-140.

a portable real - aperture radar interferometer [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(2):277-281.

[25] Strozzi T, Werner C, Wiesmann A, et al. Topography mapping with

Ground – based interferometric synthetic aperture radar and its applications

LIU Bin¹, GE Daqing¹, LI Man¹, ZHANG Ling¹, WANG Yan¹, GUO Xiaofang¹, ZHANG Xiaobo²

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China;

2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: On the basis of a detailed discussion on the principle of GB InSAR, the main data processing and analysis stages for estimating deformations starting with the GB InSAR observations are described. This paper gives a review of the main types and development trend of ground – based radar system, the main application domain and some existent problems of GB InSAR, and then summarizes the pros and cons of ground – based and space – borne InSAR for deformation monitoring.

Keywords: ground - based interferometric synthetic aperture radar; stepped frequency continuous wave(SFCW); frequency modulation continuous wave(FMCW); noise radar; multiple input multiple output(MIMO) technology

(责任编辑:李瑜)