

引用格式: Tao Li, Zhang Hong, Wang Chao, *et al.* A Review on New Multi-baseline DInSAR Methods for Surface Deformation Monitoring[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(6): 805-811. [陶利, 张红, 王超, 等. 新型多基线 DInSAR 地表形变监测技术研究动态[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(6): 805-811.]

# 新型多基线 DInSAR 地表形变 监测技术研究动态

陶 利<sup>1,2</sup>, 张 红<sup>1</sup>, 王 超<sup>1</sup>, 汤益先<sup>1</sup>

(1. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**合成孔径雷达干涉测量(InSAR)是一项广泛采用的雷达遥感测量技术, 可以获取大区域、长时间、毫米级的地表形变监测, 是 SAR 图像应用研究的热点。从 InSAR 技术监测地表形变时面临的问题出发, 分析了近年来多基线 DInSAR 方法的新进展, 论述了相干目标算法、分布目标算法及 SAR 层析成像技术等监测地表运动时的原理及技术应用, 详细讨论了 DInSAR 地表形变监测由二维参数研究发展至三维、四维空间, 由城区发展至广阔非城区地表监测的发展趋势。

**关 键 词:**多基线 DInSAR; 相干目标; 分布目标; 地表形变监测

**中图分类号:**P 236 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2012)06-0805-07

## 1 引 言

自 1951 年以来, 合成孔径雷达(SAR)的出现掀起了雷达技术的重要革命, 其具有全天时、全天候的优势及由此产生的广泛应用前景, 吸引了雷达科学界的众多注目。随后不同波段、不同极化、不同模式及不同分辨率的 SAR 系统纷纷出现, 随着 SAR 系统的成熟与完善, SAR 图像应用研究成为技术发展的热点。20 世纪 60 年代提出的合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术, 作为技术研究的一个重要分支, 致力于解决从复杂的地物场景中获取地表三维信息和细微变化信息, 开拓了卫星遥感技术监测地表形变的先河, 在地震、火山运动、冰川移动、山体滑坡、城市地面沉降等方面取得了大量应用成果, 是一项有效的低成本监测工具<sup>[1-10]</sup>。

早期 SAR 干涉测量主要用于地形绘制, 两轨及三轨差分干涉测量(DInSAR)技术的发展带来了地表形变的大区域测量<sup>[2-3]</sup>, 但此类单基线方法在反演

地表缓慢形变时存在时间和空间去相干问题。多图像的联合分析能够增加不同干涉相位成分的区分能力, 同时专注于稳定相干目标(如永久散射体 PS)的研究可以克服上述去相干因素的影响。于是多基线相干目标 DInSAR 反演长时间地表形变研究发展起来<sup>[4-9]</sup>, 包括 1999 年 Ferretti 等<sup>[5-6]</sup>提出的永久散射体干涉 PSInSAR 技术, 2002 年 Berardino 等<sup>[7]</sup>提出的小基线集 SBAS 方法, 及 2003 年 Mora 等<sup>[8]</sup>发展的相干像素分析 CPT 技术等。

相干目标 DInSAR 技术在一些条件良好的城市区域取得了令人瞩目的成果, 但该技术对于相干目标的选取及相位信息处理, 限制了其对相干目标缺少的广大非城区应用研究。近年来 Rocca 与 Gurnieri 等<sup>[10-12]</sup>提出了基于分布式目标(DS)的多基线干涉 SAR 算法, 通过研究多时相 SAR 图像中 DS 目标的数据相干性统计信息, 能够获取高精度的地形及地表运动测量, 解决了广大非城区的地表形变监测问题。

收稿日期: 2011-11-02; 修订日期: 2012-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971198), 国家“863”计划项目(2011AA120404)。

作者简介: 陶 利(1983—), 女, 安徽合肥人, 博士研究生, 主要从事 InSAR 技术及应用研究。E-mail: lit@ceode.ac.cn。

通讯作者: 张 红(1972—), 女, 安徽南陵人, 研究员, 主要从事微波遥感研究。E-mail: hzhang@ceode.ac.cn。

对于建筑物比较密集的城区或地形陡峭区域,其 SAR 分辨单元内常常有多个散射中心,使得相干目标算法的单散射中心建模机制不再成立,从而影响城区地表参数估计的准确性。因此针对传统多基线干涉 SAR 技术无法区分分辨单元内多个散射体的问题,2008 年 Fornaro 等<sup>[13-15]</sup>发展了 SAR 层析 (Tomography) 及其差分技术,从 SAR 成像原理及数据处理方法出发,对分辨单元内多个散射体进行高度维与时间速度维成像分析,以获取多个散射体的定位识别及参数估计,对城区基础设施的安全监测具有重要意义。

总的说来,随着各类算法的出现和技术推动,InSAR 地表形变监测由单基线算法发展至多基线数据联合分析,由相干目标信息提取发展至分布式目标信息研究,由二维空间信息反演发展至三维及四维信息获取。SAR 形变反演算法的逐步发展与完善,对地表形变详细模式探索与监测具有重要的研究意义。本文将重点阐述近年来新型 DInSAR 发展趋势,并分析未来 DInSAR 的发展动态。

## 2 新型 DInSAR 方法的发展

SAR 地表形变监测方法在过去几十年得到了蓬勃发展,其本质是根据地物目标上的复数据信息反演不同相位成分的分离,完成复杂情况下的地表运动监测。基于此,多基线 SAR 图像形变测量方法可归为三大类:① 基于相干目标的 DInSAR 方法;② 基于分布式目标的 DInSAR 方法;③ 基于 SAR Tomography 技术的地表形变检测方法。

### 2.1 相干目标 DInSAR 方法

传统 DInSAR 侧重于单次形变的研究,通常要求 SAR 图像具有较小的时间及几何基线,以减少干涉去相干的影响,同时对用于地形去除的数字高程模型 (DEM) 精度要求非常高。在传统 DInSAR 的基础上,研究人员开始了长时间地表缓慢形变的研究。通过对大量 SAR 图像的研究分析,他们发现在城区和岩石地区存在大量相位和幅度变化稳定的相干目标,利用这些稳定目标的相位特征,可以进行长时间尺度上的地表形变分析,于是相干目标 DInSAR 方法发展起来。

1999 年,Usai 等<sup>[16-17]</sup>通过选取高相干性的人工建筑、岩石等作为目标像素,提出利用最小二乘法对差分干涉相位序列进行处理获取长时间地表形变,这是今天许多数据处理方法研究 PS 技术的基本思想。同年, Ferretti 等<sup>[18]</sup>提出了永久散射体干涉

PSInSAR 技术,通过对组成差分相位的各个分量时空特性的分析,反演精确的地表形变和 DEM 信息。PS 技术中函数模型是其算法原理的基础。对于  $M$  干涉图,通过定义形变速率  $v$  与时间系数  $C_v$ 、及高程误差  $\epsilon$  与基线系数  $C_\epsilon$  之间的二维模型函数,并将其与差分干涉相位  $\varphi_i$  之差组成目标函数,如式 (1):

$$\xi = \frac{1}{M} \cdot \left| \sum_{i=1}^M \exp\{j[\varphi_i - (C_v \cdot v + C_\epsilon \cdot \epsilon)]\} \right| \quad (1)$$

显然目标函数最大化是模型函数与真实观测量吻合程度高低的判据。通过二维周期图的回归使得目标函数最大化,求得形变速率和高程误差两个目标量。2007 年 Ferretti 等<sup>[18]</sup>着重讨论了 PS 技术的形变测量精度问题,通过角反射器实验验证了多基线干涉 SAR 测量确实可以对形变时间序列估计达到亚毫米级的精度。由于这里 PS 算法函数模型采用了一般的线性模型假设,因此可以根据监测区域情况对相位模型进行调整以监测不同地表运动模式。Colesanti 等<sup>[9]</sup>及 Bell 等<sup>[19]</sup>在文献中讨论了对季节性波动地表沉降的测量。Monserrat 等<sup>[20]</sup>讨论了由成像温差带来的建筑物热形变估计,通过相位模型调整进而同时求解地表沉降及建筑物热形变两种运动参数。

小基线集 SBAS 方法将所获取 SAR 数据根据小的时间及空间基线原则进行组合,利用奇异值分解方法将多个小基线集数据联合起来求解地表形变速率及形变时间序列<sup>[7]</sup>。2011 年 Lauknes 等<sup>[21]</sup>采用 L2 范数方法对 SBAS 技术进行系统参数求解; Zhang 等<sup>[22]</sup>则将 SBAS 方法应用到相邻点相位差分分析中,并计算其加权最小二乘参数解; Samsonov<sup>[23]</sup>给出了对 SBAS 算法在 L 波段数据下的参数求解与改进。Mora 等<sup>[8]</sup>结合 PS 和 SBAS 方法的特点提出了相干点形变分析方法 CPT,并在实验中少量 SAR 图像的条件下也取得了很好的结果。Blanco-Sanchez 等<sup>[24]</sup>对 CPT 技术进行了改进,对不同质量相干目标进行了多层处理; Pipia<sup>[25]</sup>基于 CPT 技术采用 X 波段 HH 及 VV 双极化数据进行了地面沉降现象研究。此外,2004 年 Hooper 等<sup>[26-27]</sup>提出了一种 StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) 方法,用以分析火山运动地壳形变问题,并于 2007 年对该算法进一步修正。StaMPS 方法没有使用先验的形变信号时间变化模型,而是通过相位的空间相关性处理获取形变信号参数,解决火山形变参数反演时因稠密植被带来大多数像素的时间去相关问题。

## 2.2 分布式散射体 DInSAR 方法

由于非城区域的相干目标较少,限制了多基线相干目标 DInSAR 技术对广大非城区地表的应用研究。近年来研究人员开展了分布式目标 DInSAR 方法研究,以获取广阔区域地表运动及地形测量。分布式散射体 DS 普遍存在于地表上,它们具有大片的散射面积,且在 SAR 分辨单元内具有均匀统计特性,如裸地、地面及稀疏植被区域等。2003 年 Ferretti 等<sup>[28]</sup>较早考虑了非城区散射目标的反射率变化问题,进行散射稳定信息分类如永久散射体 PS、半 PS (Semi-PS)、时间性 PS (Temporary-PS) 等,这些地物目标的几何信息提取对于扩展时间序列 SAR 数据应用范围十分重要。

2007 年 Rocca<sup>[10]</sup>首次分析了分布式目标的时间去相干规律,认为散射体的时间去相干主要是由于分辨单元内散射体的布朗运动或多个连续独立同分布运动之和造成的,并对其进行指数时间衰减建模。继而考虑研究区域内 SAR 图像可组成的所有差分干涉图,并作如下两个条件假设:首先认为所有几何相位影响均得到补偿,从而把去相干因素全部归结为时间去相干;其次这里考虑较小的形变相位及较小的大气相位,以便能进行小相位近似从而简化处理过程。于是,引入指数时间衰减模型并通过图像统计特性分析,建立干涉图期望与目标去相干规律之间的相干性表达,如式(2):

$$\gamma_{t_k, t_l} \sim \rho^{|t_k - t_l|} [1 + j((t_k - t_l)\phi + a_{t_k} - a_{t_l})] \quad (2)$$

其中:  $\rho = e^{-T/\tau}$  为去相干模型,  $\tau$  为去相干时间常数,  $T$  为已定义时间间隔,  $(t_k, t_l)$  为 SAR 干涉像对成像时间,  $\phi$  为地表形变相位,  $(a_{t_k}, a_{t_l})$  为大气相位。考虑式(2)两端的复数据虚部并联立求解方程可获取未知参数求解。Rocca 对罗马地区进行了分布式散射体干涉 SAR 技术反演地表形变的实验探索,使用 17 幅重访周期为 3 d 的 ERS-1 数据来估计和验证时间去相关模型参数,得到了去相关时间为 40 d、短期相干性为 0.6 的指数模型实验结果。然后对 DS 目标沉降速率误差进行了评估,最终得到了可以与 PSInSAR 测量精度相对应的 4 ~ 4.5 mm/a 的速率误差。

2008 年 Guarnieri 等<sup>[11-12]</sup>研究分布式散射体多图像 DInSAR 技术时,提出一种新的思路,主要分为两个步骤进行。第一步从数据中估计出干涉相位,第二步使用这些相位来重新获得感兴趣的物理参数,如地表运动形变、残留地形及大气相位等。因干涉相位估计是从所有数据中估计得到,文献中称

其为联合相位集合。对联合相位进行解缠后,继而可以求解地表形变和残余地形参数估计。接着他们采用 18 幅 EnviSat 数据对 Las Vegas 附近一片沙漠区域做了 DS 干涉测量的参数获取实验。由于该成像区域具有较高的时间稳定性,其实验中将时间去相干因素忽略不计,最后得到了该区域离差为 1m 的精确地形高程,及离差为 0.5 mm/a 的地表形变速率估计。

对上述两种方法比较可知,Rocca 方法是通过目标进行时间去相关机制建模,并从干涉图中得到感兴趣参数的最优估计,而 Guarnieri 等的联合相位估计方法则是直接从数据处理的角度来进行参数估计求解,但两种方法在较高的信噪比及较大的数据量条件下是渐进一致的。

近期,Ferretti 等<sup>[29]</sup>提出了一种新的多基线干涉 SAR 处理算法 SqueeSAR,通过考虑 PS 及 DS 目标的不同统计行为特性而对其进行联合处理,获取地表形变参数反演。算法主要包括 3 个步骤:① 定义目标的分布函数,使用 KS 检验方法计算并选择合适 DS 目标;② 联合所有数据估计 DS 目标的干涉相位;③ 采用传统 PSInSAR 算法联合 PS 及 DS 目标进行处理求解地形及形变参数。步骤二中关于 DS 目标的干涉相位估计,同前文 Guarnieri 等<sup>[12]</sup>方法中的联合相位估计原理是一致的。该算法的优点是既可以对 PS 及 DS 目标进行联合处理,而不需要对传统 PSInSAR 处理流程进行重大改变,同时也提高了地面信息的监测密度。最后,Ferretti 等采用 65 景 Radarsat 数据在意大利 Alpine 地区取得良好实验结果,验证了新方法的有效性。

此外,Perissin 及 Wang 等<sup>[30-34]</sup>讨论了关于部分相干目标 (Partially Coherent Targets) 及准 PS 目标 (Quasi Permanent Scatterers) 的 DInSAR 算法分析。主要思想是通过放宽相干目标的选择条件,选取部分相干目标进行数据相干性处理和相位模型数据调整,以获取地表形变参数。最后通过数据实验对中国巴东地区进行了山体滑坡测量及三峡大坝形变监测。

## 2.3 SAR Tomography 成像技术

相干目标算法中散射模型机制认为每个分辨单元内仅有一个主相干点。然而在陡峭地形或散射体空间密度较大区域,一个 SAR 分辨单元接收的信号往往是多个散射中心的叠加。这种情况在城区成像时常发生,显然相干目标算法对其分辨能力明显不够。正确的散射体数目检测,精确的目标高度估计

及定位,是改进 SAR 在城区及复杂建筑物监测能力方面的重要问题。

多基线 SAR Tomography 层析成像技术是 InSAR 的一种扩展,通过多幅天线在高度方向上的孔径合成,具有三维层析成像的能力,也称 SAR 3D 成像技术。SAR Tomography 差分技术同时提供了时间维信息,因而通常称之为 4D 成像技术。其测量原理如下:假设在某一 SAR 获取时间内,有多副天线对数据进行接收,考虑 SAR 图像中某一方位—距离向像素,其接收信号中包含了多个高度向上重叠的散射目标,且目标可能具有缓慢地表形变。通过数据处理分析可知,此时接收信号可以看成是高度—速度平面上散射体分布的二维傅立叶变换采样,于是对其进行反变换可以重建该分辨单元内散射体的高度—形变速度分布,从而对多散射目标进行成像检测。

SAR Tomography 差分技术能够检测像元内的多散射目标并解决复杂地形情况下的地表运动监测问题,从而克服了传统 PS 技术的不足,将多基线 SAR 形变测量技术发展至三维及四维空间领域<sup>[13-15]</sup>。2008~2009 年, Fornaro 等<sup>[13-15]</sup>采用 4D 成像技术多个散射体进行检测,通过对真实散射体分布与理想点散射目标响应做互相关测量,获取形变速率及高度位置等参数求解,他们采用 43 景 ERS-1/2 数据用于罗马地区 4D 成像实验,并对场景中单散射及双散射目标进行精确三维定位及缓慢形变速率估计。Maio 等<sup>[35]</sup>使用 58 景 ERS-1/2 数据对 Naples 城市进行了基于 4D 成像技术的多目标检测实验。此外,2008 年 Zhu 等<sup>[36]</sup>首次采用高分辨率 TerraSAR-X 数据用于城区多目标层析分辨试验,并将检测目标同地面真实情况进行验证。总的来说, SAR Tomography 及 4D 成像技术从 SAR 数据处理方法出发,能够进行高度维与时间速度维的成像和分析,很好地解决了城区高密度复杂建筑区的识别和监测问题。

另外,关于多散射目标的检测及形变参数估计问题,这里需提到 Ferretti 等<sup>[37]</sup>在 2005 年发展的一种“高阶 PS 分析(Higher-order Permanent Scatterers Analysis)”技术。不同于成像分析技术,该高阶分析方法则是采用参数超分辨率算法处理分辨单元内多散射中心的问题。

## 2.4 新方法的发展趋势

由上述分析可以看出,这 3 类方法已经取得了一定的研究成果,未来在以下 3 个方面可以开展更

深入的研究。

(1)PS 目标、DS 目标是多基线干涉 SAR 算法处理的载体,也是算法首要的目标选取步骤。PS 及 DS 目标的物理特性研究对其正确认识及选取至关重要。未来具有更优性能的高分辨率 SAR 系统将不断涌现,高分辨率下 SAR 目标像素也将有新的特性表现。对于目标像素的准确定位及深入研究能够拓宽 SAR 图像参数反演的新景象,随之也将推动多基线干涉 SAR 技术反演地表形变方法的新进展。

(2)关于分布式散射体干涉 SAR 研究,一个重要的问题是关于干涉相干性的可靠估计。Rocca 等的方法主要考虑了时间去相干作用,采用较大估计窗口对其进行合适的物理建模。而 Guarnieri 等在其实验中主要考虑空间去相干影响,通过对已有地形的研究获取相干性估计。其方法中均有较大的理想条件在内,因此未来在分布式散射体技术研究中,对多种去相干因素的详细分解建模将能给出更精确的参数处理结果。

(3)当对复杂地形如城区进行高分辨率形变监测时,可以将 SAR Tomography 技术联合相干目标干涉 SAR 技术对城区进行细致形变监测。如对于永久散射体干涉 SAR 的测量结果,可以选取城区建筑物较密集地区使用 SAR Tomography 技术对目标点进行频谱估计,以区分多个散射体及其位置参数。也可以使用 4-D 成像技术作为传统干涉方法的有效替换,对复杂城区求解各个散射目标位置及形变时间序列参数。

## 3 基于新数据的 DInSAR 发展

伴随着多基线 SAR 算法的深入研究,基于新型高分辨率 SAR 数据以及极化特征的研究也在逐步展开。

### 3.1 基于高分辨率 SAR 数据的 DInSAR 技术

随着新一代 SAR 系统的发射成功,德国 TerraSAR-X、意大利 Cosmo-SkyMed 卫星的 SAR 影像的分辨率已达到 3 m,能够揭示更细节的建筑物形变信息,带来新的地面目标测量影像<sup>[38-41]</sup>。

2008 年,Adam 等<sup>[38]</sup>利用 TerraSAR-X 数据开展了传统 InSAR、PSInSAR 和 SAR 层析的研究,取得了很好的研究结果。所展示的 PS 点与 Google Earth 的三维模型叠加的结果,栩栩如生地揭示了地表形变的结果。同年,Gernhardt 等<sup>[39]</sup>讨论了高分辨率下同一建筑物上多个 PS 目标之间的相对运动估计问题。2009 年,Eineder 等<sup>[40]</sup>研究了 Terra-

SAR-X 聚束模式下的干涉图,并给出对图像中大型建筑物的直接高度测量以及结构形变研究。很明显,高分辨率 SAR 系统能够提高对地面目标尤其城区建筑物的细节形变的动态把握。

2009 年,Costantini 等<sup>[42]</sup>采用“永久散射对”(PSP)方法对俄罗斯 sochi 地区的地表形变进行了监测,基于 26 景 Cosmo-SkyMed 数据的实验结果表明,高分辨率 SAR 图像能够更准确地获取地表形变特征。

已有研究表明,米级分辨率的 SAR 影像,相对于中等分辨率(10~30 m)的 SAR 图像,能够提供更细致的地物散射特征,从而更利于开展相干目标的 DInSAR 研究,也使得对城市的 SAR 层析研究成为可能。但也面临着大数据量处理等问题,未来可将现有的算法进行并行化处理,以满足高分辨率的应用需求。

### 3.2 基于极化数据的相干目标 DInSAR 技术

相干点选取是多基线相干目标干涉 SAR 处理的首要步骤。目标点的选取取决于算法应用情况,当所获取图像数量较多、研究区域为城区时常使用幅度准则选择点目标,而若图像较少或非城区大区域地面运动研究则常采用相干性准则进行目标像素选取。近年来,极化 SAR 信息处理用于目标像素选择研究发展起来。2010 年,Navarro-Sanchez<sup>[43]</sup>通过极化信息研究,结合干涉图平均相干性及幅度信息对相干目标点进行选取。2011 年,Samsonov 等<sup>[44]</sup>提出一种基于极化相位差分的 PS 点选择技术,并通过实验获取了具有主要奇、偶散射特性的 PS 目标。丰富的极化信息对于目标特性研究大有裨益,未来更深入的研究能够揭示更准确的目标行为建模,无论对于目标选取步骤还是参数估计方法都将有更大的改进。

## 4 结 语

本文回顾了 SAR 图像地表形变监测研究 20 a 间发展的重要成果,详细介绍了基于不同地物目标的多基线干涉 SAR 算法的研究进展。近 20 a 多基线 SAR 图像地表形变研究表明:该项技术已经取得比较深入的技术沉淀与发展,可获取更广阔及更细致区域的地表运动监测结果,从而提高人们对地质灾害的动态认识和响应能力。

### 参考文献(References):

[1] Hanssen R F. Radar Interferometry: Data Interpretation and

Error Analysis[R]. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 2001: 328. ISBN: 0-7923-6945-9.

- [2] Massonnet D, Rossi M, Carmona C. The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry[J]. Nature, 1993, 364: 138-142.
- [3] Zebker H A, Rosen P A, Goldstein R M. On the Derivation of Coseismic Displacement Fields Using Differential Radar Interferometry: The Landers Earthquake[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(B10): 19617-19634.
- [4] Usai S. A Least Squares Database Approach for SAR Interferometric Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(4): 753-760.
- [5] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[C] // IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, Germany, 1999: 1528-1529.
- [6] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 28(5): 2202-2212.
- [7] Berardino P, Fornaro G, Lanari R. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [8] Mora O, Mallorqui J J, Broquetas A. Linear and Nonlinear Terrain Deformation Maps from a Reduced Set of Interferometric SAR Images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(10): 2243-2253.
- [9] Colesanti C, Ferretti A, Fabrizio F, et al. SAR Monitoring of Progressive and Seasonal Ground Deformation Using the Permanent Scatterers Technique[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(7): 1685-1701.
- [10] Rocca F. Modeling Interferogram Stacks[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(10): 3289-3299.
- [11] Guarnieri A M, Tebaldini S, Rocca F. Optimum Interferograms Stack Versus PS: Multifrequency Analysis[C] // Envisat Symposium 2007 in Montreux, Switzerland, 2007.
- [12] Guarnieri A M, Tebaldini S. On the Exploitation of Target Statistics for SAR Interferometry Applications[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(11): 3436-3443.
- [13] Fornaro G, Reale D, Serafino F. 4D SAR focusing: A Tool for Improved Imaging and Monitoring of Urban Area[C] // IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, Massachusetts, 2008.
- [14] Fornaro G, Reale D, Serafino F. Four Dimensional SAR Imaging for Height Estimation and Monitoring of Single and Double Scatterers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(1): 224-237.
- [15] Fornaro G, Serafino F. 4-D SAR Imaging: The Case Study of Rome[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,

- 2010,7(2):236-240.
- [16] Usai S, Klees R. SAR Interferometry on a Very Long Time Scale: A Study of the Interferometric Characteristics of Man-made Features[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(4): 2118-2123.
- [17] Usai S. A Least-squares Approach for Long-term Monitoring of Deformations with Differential SAR Interferometry[C]// IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002 Toronto, Canada, 2002: 1247-1250.
- [18] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(5): 1142-1153.
- [19] Bell J W, Amelung F, Ferretti A, *et al.* Permanent Scatterer InSAR Reveals Seasonal and Long-term Aquifer-system Response to Groundwater Pumping and Artificial Recharge[J]. Water Resource Research, 2008, 44(W02407): 1-18.
- [20] Monserrat O, Crosetto M, Cuevas M, *et al.* The Thermal Expansion Component of Persistent Scatterer Interferometry Observations[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(5): 864-868.
- [21] Lauknes T R, Zebker H A, Larsen Y. InSAR Deformation Time Series Using an L1-norm Small-baseline Approach[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(1): 536-546.
- [22] Zhang L, Ding X L, Lu Z. Modeling PSInSAR Time Series Without Phase Unwrapping[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(1): 547-556.
- [23] Samsonov S. Polarization Topographic Correction for ALOS PALSAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(7): 3020-3027.
- [24] Blanco-Sanchez P, Mallorqui J J, Duque S, *et al.* The Coherent Pixels Technique (CPT): An Advanced DInSAR Technique for Nonlinear Deformation Monitoring[J]. Pure and Applied Geophysics, 2008, 165: 1167-1193. DOI: 10. 1007/s00024-008-0352-6.
- [25] Pipia L. Polarimetric Differential SAR Interferometry: First Results with Ground-based Measurements[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(1): 167-171.
- [26] Hooper A, Zebker H, Segall P. A New Method for Measuring Deformation on Volcanoes and Other Natural Terrains Using InSAR Persistent Scatterers[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31: L23611. DOI: 10. 1029/2004GL021737.
- [27] Hooper A, Segall P, Zebker H. Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcan Alcedo, Galapagos[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: B07407. DOI: 10. 1029/2006jb004763.
- [28] Ferretti A, Colesanti C, Perissin D. Evaluating the Effect of the Observation Time on the Distribution of SAR Permanent Scatterers[C]//FRINGE 2003 Workshop in Frascati Italy, 2003: 1-5.
- [29] Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, *et al.* A New Algorithm for Processing Interferometric Data-stacks; SqueeSAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(9): 3460-3470.
- [30] Prati C, Ferretti A, Perissin D. Recent Advances on Surface Ground Deformation Measurement by Means of Repeated Space-borne SAR Observations[J]. Journal of Geodynamics, 2009: 1-10. DOI: 10. 1016/j. jog, 2009, 10. 011.
- [31] Perissin D, Ferretti A. Repeat-pass SAR Interferometry with Partly Coherent Targets[C]//IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain, 2007.
- [32] Perissin D, Wang T, Novali F. Monitoring Terrain Motion in China by Means of Spaceborne SAR Images[C]//2009 Urban Remote Sensing Joint Event, Shanghai, China, 2009.
- [33] Perissin D, Prati C, Rocca F, *et al.* PSInSAR Analysis over the Three Gorges Dam and Urban Areas in China[C]//2009 Urban Remote Sensing Joint Event, Shanghai, China, 2009.
- [34] Wang T, Perissin D, Rocca F, *et al.* Three Gorges Dam Stability Monitoring with Time-series InSAR Image Analysis [J]. Science China, Earth Sciences, 2011, 54(5): 720-732.
- [35] Maio A D, Fornaro G, Paucillo A. Detection of Single Scatterers in Multidimensional SAR Imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(7): 2284-2297.
- [36] Zhu X X. Spectral Estimation for Synthetic Aperture Radar Tomography[D]. Munich: ESPACE in Munich University of Technology, 2008.
- [37] Ferretti A, Bianchi M, Prati C. Higher-order Permanent Scatterers Analysis[J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2005, 20: 3231-3242.
- [38] Adam N, Eineder M, Martinez N Y, *et al.* High Resolution Interferometric Stacking with TerraSAR-X[C]//IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008.
- [39] Gernhardt S, Hinz S. Advanced Displacement Estimation for PSI Using High Resolution SAR Data[C]//IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, Massachusetts, 2008: 1276-1279.
- [40] Eineder M, Adam N, Bamler R, *et al.* Spaceborne Spotlight SAR Interferometry with Terra SAR-X[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(5): 1524-1535.
- [41] Wegmuller U, Walter D. Nonuniform Ground Motion Monitoring with Terra SAR-X Persistent Scatterer Interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2): 895-904.
- [42] Costantini M, Falco S, Malvarosa F, *et al.* Method of Persistent Scatter Pairs (PSP) and High Resolution SAR Interferometry[C]//IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium 2009, Cape Town, South Africa, 2009.
- [43] Navarro-Sanchez V D. A Contribution of Polarimetry to Satel-

lite Differential SAR Interferometry; Increasing the Number of Pixel Candidates[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(2): 276-280.

[44] Samsonov S, Tiampo K. Phase Difference Analysis for Selection of Persistent Scatterers in SAR Interferometry[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(2): 331-335.

# A Review on New Multi-baseline DInSAR Methods for Surface Deformation Monitoring

Tao Li<sup>1,2</sup>, Zhang Hong<sup>1</sup>, Wang Chao<sup>1</sup>, Tang Yixian<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Digital Earth Science, Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*  
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) is a widely used technology of radar remote sensing, which can potentially measure centimetre-scale changes in deformation over timescales of days to years, and becomes a hotspot of SAR image applications. In this paper, for the problem of InSAR technology for surface deformation monitoring, we analyze the new progress of multi-baseline DInSAR methods in recent years, and discuss the principles and applications, including coherent target DInSAR, distributed target DInSAR, SAR tomography, and so on. Moreover, the trends of surface deformation monitoring using DInSAR, which develop from two dimension parameters to three dimensional four-dimensional, and space from city area to broad non-city area in detail.

**Key words:** Multi-baseline DInSAR; Coherent target; Distributed target; Surface deformation monitoring