

多基线干涉 SAR 测量技术发展及趋势分析

庞 蕾¹, 张继贤¹, 范洪冬²

(1. 中国测绘科学研究院, 北京 100039; 2. 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏徐州 221116)

摘 要: 本文针对多基线干涉合成孔径雷达新型对地观测技术, 综合分析了其发展历史、应用范围、以及多基线干涉 SAR(合成孔径雷达)系统现状. 同时, 对多基线干涉 SAR 测量技术数据处理关键技术等方面的研究进展, 以及在测绘、海洋、建筑物监测、水文、地面沉降监测等领域的应用潜力进行了研究与阐述. 最后针对地形测量应用领域, 着重论述了其相关研究热点及未来发展趋势, 并初步分析了部分尚待解决的问题.

关键词: 多基线; 干涉 SAR; 相位估计; SAR 层析成像; 分布式 SAR

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 09-2152-06

Progress and Tendency of Multibaseline Synthetic Aperture Radar Interferometry Technique

PANG Lei¹, ZHANG Ji-xian¹, FAN Hong-dong²

(1. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China;

2. Collage of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: For the new earth-observation technique- multibaseline SAR (Synthetic Aperture Radar) interferometry, this paper analyzed its development history, application fields and the existing systems' status. And, it discussed the research progress for the key technique during data processing, the application potential in fields of surveying and mapping, inspecting of ocean and buildings, hydrology, land subsidence monitoring and so on. Eventually it emphasized the relative research focuses and future development trend applied in terrain mapping, and provided a primary analysis of some questions to be resolved.

Key words: multibaseline; interferometric SAR(Synthetic Aperture Radar); phase estimation; SAR tomography; distributed SAR

1 引言

传统意义上的合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)干涉测量技术是指单基线 InSAR(Interferometric SAR)技术, 它通常利用两个不同相位中心获取的 SAR 信号的相位差反演地面高程信息, 由其发展形成的差分干涉 SAR(D-InSAR)、极化干涉 SAR(PolInSAR)及永久散射体干涉测量(PSInSAR)等技术在高精度地表三维信息获取方面均有出色的性能表现. 多基线 SAR 干涉测量(Multibaseline SAR interferometry)技术是上个世纪九十年代提出的一种新型合成孔径雷达地面测绘技术, 它可以获取比传统的单基线 InSAR 测量更为精确的地面三维信息. 它和多频率干涉 SAR 测量技术统称为多通道干涉 SAR 测量技术, 二者都是对常规单基线干涉 SAR 测量技术的有效拓展^[1]. 与常规干涉 SAR 测量技术相比, 多基线干涉 SAR 的信号处理方法能够克服或减少由于目标高度的陡峭变化、较大噪声干扰以及在获取具

有相同斜距的散射点高度时带来的不利影响, 其主要优势表现在以下几点: (1)复杂相位解缠过程的简化; (2)更高精度的高程信息获取能力; (3)对高起伏地形测量的自适应性; (4)有效降低盲角范围等^[2,3].

本文从多基线干涉 SAR 技术的发展历史、应用范围、地形测量数据处理关键算法、以及现有的多基线(多频率)干涉 SAR 系统现状等几个方面, 对多基线干涉 SAR 测量技术的发展进行了综合分析, 并对其在测绘、海洋、建筑物监测、水文、地面沉降监测等领域的应用潜力进行了研究与阐述, 同时针对地形测量应用领域, 对其相关研究热点、未来发展趋势及部分尚待解决的问题进行了初步的分析.

2 应用现状

由于拓展了传统干涉 SAR 系统对于垂直分布地物特征的辨别能力, 多基线干涉 SAR 系统可以有效地用于地形建模及地表植被参数估计, 同时, 在城市建筑物

信息提取、地面沉降监测、生态监测、水文与地球物理等应用领域也展现出极大的应用前景.其主要应用领域包括:

(1)高精度 DEM 反演:高精度的 DEM 反演是多基线干涉 SAR 技术的重要应用方向.常规干涉 SAR 地形测量过程中,DEM 产品的精度受到热噪声、影像失配准、基线估计误差等多种因素的影响^[4].通过增加干涉图的多基线干涉 SAR 技术,可以有效消除大部分常规干涉 SAR 所面临的问题.尤其是大大增加了相位解缠的高程模糊度,使得在相位解缠过程中可以同时利用所有有效信息,限制相位不连续现象的影响,并通过多幅干涉图的数据融合获取到更高精度的 DEM 重构产品.

(2)植被参数估计:多基线干涉 SAR 技术可以成功用于植被参数估计以及森林垂直剖面特征探测.该技术很早体现出其在森林生物量估计、以及生态监测等方面的巨大应用潜力^[5,6].尤其是结合极化干涉 SAR 信息的多基线极化干涉 SAR 技术,对于植被覆盖具有独特的识别能力,并已经在植被层散射机制处理、植被参数反演等方面得到有效的试验研究^[7,8],适用于全球尺度的生态管理及森林产量评估等应用领域.

(3)城市建筑物监测:多基线 SAR 干涉系数可以简便的用来进行城市建筑物高度变化监测,通过空间去相关模型及多基线干涉系数图反求建筑物高度变化.该方法尽管不需要任何先验的地面信息就可以进行较为理想的建筑物高度反演,比多基线层析成像技术的 3D 技术实现起来更为简单,但已有的研究表明,目前阶段在城市建筑物监测应用中仍然不及 Lidar 技术有效^[9].

(4)海洋应用:通过采用隙缝天线模式的硬件技术,多基线干涉 SAR 系统可以实现对海洋表面包括海流模式、速度变化、相干时间以及湍流现象等的监测应用^[10,11].该技术正是基于沿轨干涉 SAR 测量原理,利用时间或相位差实现海洋表面动目标监测.

(5)地面沉降监测:多基线差分干涉 SAR (Multibaseline DInSAR)技术是多基线干涉 SAR 技术的另一个重要发展方向.它将多基线干涉 SAR 与差分处理相结合,利用少量数据进行多基线组合处理,增大了观测值的数量,能准确获取线性地表沉降速率,展现出在城市缓慢沉降监测方面的技术优势^[12,13].

3 数据处理算法研究

3.1 多基线干涉相位估计算法

在单基线干涉 SAR 数据处理方法中,相位解缠是至关重要的一个环节.常规干涉 SAR 的相位以 2π 为模,解求绝对相位必需先计算并生成干涉条纹,而多基线干涉 SAR 的相位以 $2n\pi$ 为模(n 是基线个数).这使得其相位展开范围得以大大扩展,也正是多基线干涉

SAR 影像无需复杂的相位解缠就可以直接估计绝对相位的主要原因.

早在 1994 年,许多多基线(多频)干涉 SAR 影像相位估计的方法就已经得到研究,包括早期的中国剩余定理(Chinese Remainder Theorem, CRT)、投影方法、以及线性组合方法、及小波分析方法等^[4,14,15].其中, CRT 方法由于其误差分布特征而不太适合于实际操作;线性组合方法虽然较为简单、计算量较小,但受噪声的影响较大;而投影方法则已被证明容易出现较大的误差.近年来,这些方法已经较少见诸于文献之中.其后, Thompson 和 Robertson 提出利用级联迭代方法进行相位展开^[16],即先利用较短基线展开干涉相位以减少相位展开误差,然后再利用较长基线来进一步展开相位以提高高程测量精度,既利用了短基线较好的相位展开性能,又保持了长基线高程测量的高精度性.文献^[17]中提出一种基于联合子空间投影的处理方法,虽然能够在存在配准误差时获得满意的相位展开结果,但需要在估计绝对干涉相位时首先确定噪声子空间维数^[18,19].另外,一种采用的单基线干涉 SAR 相位解缠中的噪声消除算法,证明是简洁可行的,可有效降低迭代次数,提高高程估计精度,但需要首先确定待估计相位的不模糊范围^[20].

近年来,MLE 技术成为用来进行多基线干涉 SAR 相位估计的主要算法之一.相较于传统的 SAR 相位解缠方法,它具有对视角及地形坡度的自适应性,即使在测区先验信息知之甚少的情形下也可以应用,但是, MLE 算法最终的性能常常受到噪声的影响^[2].文献^[21]对多基线干涉 SAR 技术使用的 MLE 算法进行了较为详细的分析研究,提出一种利用全部影像实施最优频谱偏移预处理的方法,以去除大部分分布目标的去相关问题.为了获取更为稳健的相位估计效果,最近在关于多基线干涉 SAR 高精度 DEM 估计算法的研究中,已经开始逐步倾向于将一些较低分辨率的高程信息,例如 SRTM 数据等,作为先验地形参数与最大似然估计算法相结合,以克服单基线干涉 SAR 相位解缠技术的局限性^[22].研究表明,这种处理方法即使在非常陡峭或不连续的地形反演中也能保持解算结果的唯一性.为了有效克服噪声对于 MLE 算法的影响,一种方法是采用最大似然局部平面参数估计法(ML-LPPE),它在高精度 DEM 反演方面表现出了更好的性能^[23].这是一种半局部估计方法,通过引入给定像元与其邻域像元群高程之间的关系,设定该像素群的高程面近似为平面,解算满足最大似然条件的平面参数以获取像素群内每一点处的高程估值,并将其中心点的高程作为给定像元处的高程估计量.另外,可以将 MLE 算法进一步拓展至更宽范围的多基线干涉 SAR 数据处理中.通过升、降轨

雷达卫星数据生成干涉图的融合处理,辅助以较低分辨率 DEM 数据,将明显提高最终 DEM 重构的精度与效果.该算法的优势是可以同时处理不同成像几何条件下获取的数据,但是处理速度要比传统的解缠方法慢得多^[24].

另外一种多基线干涉 SAR 相位估计算法是基于 Bayesian 估计方法,它将地形重构参数包括雷达视角的估计问题归结为后验概率分布问题,该方法具有同时降低噪声及相位模糊度的有效性^[25].

但是,最大似然方法和最大后验(贝叶斯)方法均有一个缺陷,二者都要求图像配准的精度达到 1/10 到 1/100 个分辨单元,否则会严重影响相位展开性能,从而影响地形高程测量精度.一些研究正是针对此方面的问题开展了相应的改进工作,其中一种方法通过对自适应配准的干涉相位估计方法进行改进和扩展后,提出了一种基于相关系数加权观测矢量的多基线相位解缠方法,能够同时完成图像配准、干涉相位噪声滤波和相位解缠,并能在 SAR 图像配准精度较差的情况下得到较为准确的相位解缠结果^[26,27].

3.2 叠掩问题解决算法

叠掩问题的本质是由于 SAR 自身的成像特点,较大的地形坡度或者不连续性使得不同高度的散射体成像在同一个分辨单元内.采用多基线干涉 SAR 技术可以使 SAR 影像的叠掩效应得到有效改善,因为多基线 InSAR 具备垂直于视线的高度向上的分辨能力,可以通过估计各个层叠在一起的目标源的干涉相位,利用干涉 SAR 系统参数和几何参数求出其高度坐标,从而分辨出方位、斜距相同而高度不同的散射点.这是目前理论上能够彻底地解决 SAR 叠掩效应问题的有效方法^[28].于是同一分辨单元内不同高度目标的相位估计成为解决叠掩问题的主要目的,这一点对于高山地区的高精度地形测量任务意义重大,是目前能够克服普通干涉 SAR 在陡峭测区面临的噪声及阴影问题的重要解决方案.

目前,在经典的叠掩问题解决算法中,一种方法是波束成形法,但该方法容易遭到分辨率等问题的困扰^[29].近年来,Capon 算法、最小二乘算法、root-MUSIC 算法、以及各种改进的基于松弛技术的算法常常用来解决多基线干涉 SAR 技术中的叠掩效应问题^[30].但干涉相位的估计精度与成像时采用的视数多少常常成为成像处理过程中一对矛盾的约束因素,例如 MUSIC 算法等在视数很小时估计精度将会下降,而采用更多视数则给成像处理过程的数据存储造成困扰.因此在一种采用酉 ESPRIT 算法的研究中,致力于在较少的视数下提高估计的精度,或者在相同的精度要求下减少所要求的视数,这对于实际的 SAR 成像系统具有特别重要

的意义^[28].另外,可以利用基于松弛算法的技术进行多基线干涉 SAR 相位估计^[31].这种基于确定性模型的松弛算法比单纯的 M-RELAX 算法约束条件更为宽松,对干涉相位的估计性能表现更好.

4 多基线干涉 SAR 系统

多基线干涉 SAR 测量技术在机载 SAR 平台系统上最先得应用,目前为止,世界上已有多个国家拥有具备多基线干涉测量能力的机载 SAR 系统,大多数机载 SAR 系统平台,例如美国 NASA/JPL 的 AirSAR/ TopSAR 系统,具有多波段((C/P/L)、多极化特征.另外,FGAN 的 Memphis、ONEAR 的 Ramses、以及 Danish C R S 的 EMISAR 均为机载多基线干涉 SAR 系统.而 TopSAR、Memphis、Ramses、EMISAR 等系统还具有多频 SAR 干涉测量能力^[1,32].

表 1 多基线干涉 SAR 成像系统

| 系统名称 | 来源 | 干涉方式 | 基线数 | 波段 | 分辨率 (R * A) _m | 备注 |
|-------------------|-----------------------------|---------|-------|--------|-----------------------------|-----------------------|
| Cartwheel | CNES | XTI/ATI | 2~5 | L/C/X | ND | 星载 |
| Pendulum | DLR | XTI/ATI | 2 | L/C/X | ND | 星载 |
| Cosmo-Skymed | Alenia-Spazio | XTI/ATI | < = 4 | X | 2.8 * 3.2 | 星载 |
| TanDEM-X | DLR | XTI/ATI | 2 | X | 1 * 1 | 星载 |
| RadarSAT-2 | MDA | XTI/ATI | 2 | C | 3 * 3 | 星载 |
| AirSAR/ Topsar | NASA | XTI/ATI | 2 | L/C | 3.3 * 0.8 | 机载 |
| Aes-1 | Aerosensing Radarsysteme | XTI | 2 | X | 0.5 * 0.5 | 机载 |
| AER-2 | FGAN | XTI/ATI | 2 | X | 1 * 1 | 机载 |
| Memphis | FGAN | XTI | 3 | X/W/Ka | 0.2 * 0.2 | 机载 (memp his-2) |
| PAMIR | FGAN | XTI/ATI | 4 | X | 0.1 * 0.1 | 机载 (VV/ HH) |
| OrbiSAR-1/2 | Orbisat da Amazona | XTI | 2 | X | 3.3 * 1 | 机载(全 极化) |
| ESR | DERA | XTI/ATI | 2~3 | X | 1.2 * 1 | 机载 |

注:ND 表示没有数据.

除此以外,新型星载 SAR 系统也开始具备多基线干涉测量能力,例如,目前 COSMO-Skymed 及 TerraSAR-X 等正在发展其多基线沿轨干涉测量的能力^[1,11].星载 SAR 系统多基线干涉测量的一个重要表现形式是分布式 SAR 系统.法国空间中心的 Cartwheel,德国宇航中心的 Pendulum、Tandem-X,以及意大利阿莱尼亚航天公司的 Cosmo-Skymed 均为此类星载 SAR 系统^[33~35].表 1 所列是现有的多基线干涉 SAR 系统情况.除了单航过干涉 SAR 成像系统及分布式卫星 SAR 系统以外,通过重

复轨道形式具备多基线干涉 SAR 成像能力的星载 SAR 系统还包括:ERS、ENVISAT-ASAR 等.NASA 的 SRTM 任务也具备多频干涉成像能力^[36].

5 相关研究热点及问题分析

5.1 多基线干涉 SAR 叠掩问题

多基线干涉 SAR 叠掩算法是目前解决高山地区地形测量精度的主要方法,本质上其归结为同一分辨单元内不同高度目标的相位估计问题.未来对于叠掩问题的研究将致力于乘性噪声及非均匀线阵 ULA 情形下的估计及探测,重视并逐步拓展至重轨形式下多基线干涉 SAR 叠掩问题的解决方案的研究,尤其是重复轨道形势下,如何克服大气传播造成的时间去相关及相位失真问题是其重要的考虑因素^[1,37].而且,将多基线 SAR 影像的配准-探测及估计问题联合处理或迭代处理的技术成为重要的发展趋势之一^[38].

5.2 多基线干涉 SAR 层析成像技术

多基线干涉 SAR 层析成像技术通过在垂直于视线的方向依次增加多个基线,获得高度维上的分辨力,已经成为多基线 SAR 系统 3D 成像的一个崭新的发展方向.目前,除了传统的成像算法以外,研究新的三维 SAR 成像模型及成像算法,以提高高度维分辨率是该领域的研究热点之一.在星载 SAR 系统中,如何克服常见的大气效应,以及由于不均匀卫星轨道而引入的高度维反演误差的影响是其重要研究方向之一.另外,由其发展而来的差分层析成像技术已表现出在基线与时间域进行联合数据处理的能力,可为未来高度-速度应用领域的需求提供整体解决方案^[39].

5.3 分布式星载干涉 SAR 技术

分布式星载干涉 SAR 系统常常通过 SAR 卫星或小卫星编队飞行来实现.该项技术同时利用多颗卫星上获得的相干数据,不仅能够提高常规 SAR 的成像分辨率,而且能够提高常规单基线干涉 SAR 的测高精度,或者实现三维层析成像.目前,尽管大多数分布式 SAR 系统还未能实现,但是国内外研究者已经相继开展有关卫星编队构形、数据处理、干涉方式、高分辨率成像,以及动目标检测方面的研究^[40~42].

5.4 多基线 PolInSAR 技术

多基线 PolInSAR 技术是目前 SAR 技术领域新兴的研究热点之一,具备融合 SAR 极化特征与多基线干涉能力的技术优势.多基线极化 SAR 最优相干算法仍然是其未来研究的核心技术^[43,44].该项技术在相位估计的稳定性方面比单基线情形有着明显的提高,但在实际应用过程中受时间及空间基线因素的限制较大.其解算性能取决于数据获取系统参数,如基线长度、获取时间、频率及地面介质等参数因素.未来多基线极化干

涉 SAR 最优相干技术的几个相关研究领域还包括:极化差分干涉 SAR、最优 PS 技术、以及基于最优散射机制的变化分析等^[45].

6 结论

多基线干涉 SAR 测量技术是对传统干涉 SAR 技术拓展后的一种新兴的合成孔径雷达对地观测手段.与传统干涉 SAR 测量技术相比,它的最大优势之一在于能够大大扩展相位展开范围,获取更高精度的地形测量及地表参数反演结果.尤其是三维 SAR 层析成像技术的发展,使其拥有垂直于雷达视线方向上高度维的分辨能力.这对于陡峭地形雷达成像及复杂测区的地形测量而言,具有特别重要的意义,是未来实现此类困难测绘地区地形测量任务的重要遥感技术手段.

参考文献:

- [1] Gini F, Lombardini F. Multibaseline cross-track SAR interferometry: a signal processing perspective[J]. IEEE A&E System Magazine, 2005, 2(8): 71 - 93.
- [2] Lombardo P, Lombardini F. Multi-baseline SAR interferometry for terrain slope adaptivity[A]. Proceedings of IEEE National Radar Conference, 1997[C]. New York, USA: IEEE, 1997. 196 - 201.
- [3] 徐江,唐劲松,张春华等.多基线 InSAR 信号处理中优化阵列的应用[J]. 信号处理, 2002, 18(5): 410 - 413.
Xu J, Tang J S, Zhang C H, et al. Multi-baseline InSAR using nonuniform linear arrays[J]. Signal Processing, 2002, 18(5): 410 - 413. (in Chinese)
- [4] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Multibaseline InSAR DEM reconstruction: The wavelet approach[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(2): 705 - 715.
- [5] Liseno A, Papathanassiou K P, Moreira A, et al. Analysis of forest-slab height inversion from multibaseline SAR data[A]. Proceedings of IGARSS'05[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005. 2660 - 2663.
- [6] Treuhaft R N, Chapman B D. Tropical-Forest density profiles from multibaseline interferometric SAR[A]. Proceedings of IGARSS'06[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006. 2205 - 2207.
- [7] Papathanassiou K P, Cloude S R, Reigber A, et al. Multi-baseline polarimetric SAR interferometry for vegetation parameters estimation[A]. Proceedings of IGARSS 2000[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000. 2762 - 2764.
- [8] Stebler O, Meier E, Nuesch D. Multi-baseline airborne Pol-InSAR measurements for the estimation of scattering processes within vegetation media[A]. Proceedings of IEEE IGARSS 2001[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001. 3172 - 3174.
- [9] Luckman A, Grey W. Urban building height variance from

- multibaseline ERS coherence[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(9): 2022 – 2025.
- [10] Besson O, Gini F, Griffiths H D, et al. Estimating ocean surface velocity and coherence time using multichannel ATI-SAR systems[J]. IEE Proc Pt F (Radar, Sonar and Navigation), 2000, 147(6): 299 – 308.
 - [11] Romeiser R, Breit H, Eineder M, et al. On the suitability of TerraSAR-X split antenna mode for current measurements by along-track interferometry[A]. Proceedings of IEEE IGARSS 2003[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003. 1320 – 1322.
 - [12] Mora O, Mallorqui J J, Broquetas A. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2003, 41(10): 2243 – 2253.
 - [13] Wu T, Zhang H, Wang C. Ground deformation retrieval of urban and suburb areas based on multi-baseline DInSAR algorithm: a case study in cangzhou city (China)[A]. Proceedings of IEEE IGARSS 2007[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007. 4898 – 4901.
 - [14] Ghiglia D C, Wahl D E. Interferometric synthetic aperture radar terrain elevation mapping from multiple observations [A]. Proceedings of Sixth IEEE Digital Signal Processing Workshop, 1994[C]. New York, USA: IEEE, 1994. 33 – 36.
 - [15] Xu W, Chang E C, Kwok L K, et al. Phase-unwrapping of SAR interferogram with multi-frequency or multi-baseline [A]. Proceedings of IGARSS'94[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1994. 730 – 732.
 - [16] Thompson D G, Robertson A E, et al. Multi-baseline interferometric SAR for iterative height estimation[A]. Proceeding of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symp' 99[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999. 251 – 253.
 - [17] 李海, 廖桂生. 对配准误差稳健的多基线相位展开方法[J], 电子学报, 2008, 36(9): 1670 – 1675.
Li H, Liao G S. A robust phase unwrapping method to coregistration error for multibaseline InSAR systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(9): 1670 – 1675. (in Chinese)
 - [18] Li Z F, Bao Z, Li H, et al. Image auto-coregistration and InSAR interferogram estimation using joint subspace projection [J]. IEEE Transactions on GRS, 2006, 44(2): 288 – 297.
 - [19] Li Hai, Li Z F, Liao G S, et al. An estimation method for InSAR interferometric phase combined with image auto-coregistration[J]. Science in China, Series F, 2006, 49(3): 386 – 396.
 - [20] Liu H, Zhou Y Q, Xu H P, et al. A simple implementation of multi-baseline InSAR[A]. Proceedings of Ist Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2007[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2007. 747 – 750.
 - [21] Fornaro G, Guarnieri A M, Pauciuolo A, et al. Maximum likelihood multi-baseline SAR interferometry[J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2006, 153(3): 279 – 288.
 - [22] Meglio F, Schirinzi G. DEM estimation from multi-baseline ENVISAT-ASAR interferometric data through maximum likelihood techniques[A]. Proceedings of IGARSS'07[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007. 4517 – 4520.
 - [23] Pascasio V, Schirinzi G. Multi-frequency InSAR height reconstruction through maximum likelihood estimation of local planes parameters[J]. IEEE Trans Image Proc, 2002, 11(12): 1478 – 1489.
 - [24] Eineder M, Adam N. A maximum-likelihood estimator to simultaneously unwrap, geocode, and fuse SAR interferograms from different viewing geometries into one digital elevation model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(1): 24 – 36.
 - [25] Ashok A, Wilkinson A J. Topographic mapping with multiple antenna SAR Interferometry: A Bayesian model-based approach[A]. Proceedings of IGARSS'01[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001. 2058 – 2060.
 - [26] 李海, 廖桂生. InSAR 自适应图像配准的干涉相位估计方法[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 420 – 425.
Li H, Liao G S. An estimation method for InSAR interferometric phase with adaptive image coregistration[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 420 – 425. (in Chinese)
 - [27] 李海, 廖桂生. 基于相关系数加权观测矢量的多基线相位解缠方法[J]. 自然科学进展, 2008, 18(3): 313 – 322.
 - [28] 柳祥乐, 宋岳鹏, 杨汝良. 采用西 ESPRIT 算法处理多基线 InSAR 层叠效应[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(7): 1731 – 1735.
Liu X L, Song Y P, Yang R L. Layover solution based on unitary ESPRIT algorithm in multibaseline InSAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(7): 1731 – 1735. (in Chinese)
 - [29] Homer J, Longstaff I D, Callaghan G. High resolution 3-D SAR via multi-baseline interferometry [A]. Proc IEEE Int Geosci Remote Sensing Symp [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1996. 796 – 798.
 - [30] Bordonni F, Gini F, Verrazzani L. Capon-LS for model order selection of multicomponent interferometric SAR signals[J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2004, 151(5): 299 – 305.
 - [31] Jakobsson A, Gini F, Lombardini F. On the estimation of interferometric phases for multibaseline SAR interferometry using a relaxation-based technique[A]. Proceedings of Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003. 277 – 280.
 - [32] University of Zurich. SAR Processing Results/Airborne SAR Image: units [OL]. [http://www. geo. uzh. ch/en/remotesensing-laboratory/research/radar-remote-sensing-sarlab/research-projects/sar-processing/fgan-memphis-2](http://www.geo.uzh.ch/en/remotesensing-laboratory/research/radar-remote-sensing-sarlab/research-projects/sar-processing/fgan-memphis-2), 2009 – 01 – 04.

- [33] Massonet D. Capabilities and limitations of the interferometric Cartwheel[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3): 506 – 520.
- [34] Lachaise M, Eineder M, Fritz T. Multi baseline SAR acquisition concepts and phase unwrapping algorithms for the Tandem-X mission[A]. Proceedings of IGARSS'07[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007. 5272 – 5276.
- [35] Candela L, Caltagirone F. COSMO-SkyMed: mission definition and main application and products[A]. Proceedings of POLInSAR 2003 Workshop[CD]. Noordwijk, The Netherlands: ESA Publications, 2003. p35. 1.
- [36] Rosen P, Eineder M, Rabus B, et al. SRTM mission-cross comparison of X and C band data properties[A]. Proceedings of the IGARSS 2001[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001. 751 – 753.
- [37] Lombardidi F, Ender J, RObing L, et al. Experiments of interferometric layover solution with the three-antenna airborne AER-II SAR system[A]. Proceedings of IGARSS 2004[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004. 3341 – 3344.
- [38] Li Z F, Bao Z, Suo Z Y. A joint image coregistration, phase noise suppression, and phase unwrapping method based on subspace projection for multibaseline InSAR systems[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45(3): 584 – 591.
- [39] Lombardini F. Differential tomography: a new framework for SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43(1): 37 – 44.
- [40] 刘建平, 梁甸农, 何峰. 主星带伴随小卫星编队系统的 AT-INSAR 基线研究[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 590 – 592.
- Liu J P, Liang D N, He F. Baseline analysis of along track interferometric SAR for spaceborne parasitic radar system[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 590 – 592. (in Chinese)
- [41] 张永胜, 黄海风, 梁甸农等. 星载分布式 InSAR 测高性能的理论及系统仿真评价方法[J]. 电子学报, 2008, 36(7): 1273 – 1278.
- Zhang Y S, Huang H F, Liang D N, et al. Theoretic and simulation experimental performance evaluation methods of spaceborne distributed InSAR system[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(7): 1273 – 1278. (in Chinese)

- [42] 唐智, 李景文. 编队飞行 InSAR 的平地效应与地形高度效应分析[J]. 电子学报, 2003, 31(12A): 2183 – 2186.
- Tang Z, Li J W. Flat earth effect and terrain height effect in formation flying InSAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12A): 2183 – 2186. (in Chinese)
- [43] Neumann M, Ferro-Famil L, Reigber A. Multibaseline POLInSAR coherence modeling and optimization[A]. Proceedings of IGARSS 2007[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007. 2624 – 2627.
- [44] Neumann M, Ferro-Famil L, Reigber A. Multibaseline polarimetric SAR interferometry coherence optimization[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(1): 93 – 97.
- [45] Reigber A, Neumann M, Erten E, et al. Multi-baseline polarimetrically optimised phases and scattering mechanisms for InSAR applications[A]. Proceedings of IGARSS 2007[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007. 2620 – 2623.

作者简介:



庞 蕾 女, 1971 出生, 山东潍坊人, 2006 年取得山东科技大学大地测量学与测量工程专业博士学位, 2007 年于中国测绘科学研究院从事博士后研究工作. 主要研究方向包括 SAR 测图数据处理、统计建模, 及多基线干涉 SAR 数据处理.

E-mail: panglei_mail@163.com



张继贤 男, 1965 出生, 博士生导师. 1988 年毕业于武汉测绘科技大学摄影测量与遥感系, 1994 获博士学位, 在华中理工大学进行了两年的博士后研究工作. 主要从事遥感与图像信息处理、地理信息系统、数字摄影测量、图像识别与智能控制等领域的研究工作.



范洪冬 男, 1981 出生, 博士生, 2007 年毕业于中国矿业大学获得大地测量学与测量工程专业硕士学位. 同年攻读中国矿业大学大地测量学与测量工程专业博士学位. 主要从事 SAR 图像处理及地表形变监测的研究与学习.