

SAR 差分干涉测量技术及其在地表形变监测中的应用现状

周建民,何秀凤

(河海大学卫星及空间信息应用研究所,江苏 南京 210098)

摘要 合成孔径雷达差分干涉测量技术(D-InSAR)是一种新的空间对地观测技术.它利用合成孔径雷达(SAR)的相位信息提取地表的三维信息和高程变化信息,可以监测地球表面和冰雪表面的微小变化,且探测地球表面位移变化的精度可达到 cm 量级.因此,介绍了 D-InSAR 的基本原理和发展概况,综述了 D-InSAR 在地表形变监测中的应用现状,并对 D-InSAR 的应用前景进行了展望.

关键词 合成孔径雷达干涉;差分干涉;地表形变;遥感技术

中图分类号 P225.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2005)04-0463-03

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是 20 世纪 50 年代研制成功的一种主动式传感器.这种雷达不受光照和天气条件的限制,可以实现全天时、全天候的对地观测,可以透过地表和植被获取地表以下的信息.

SAR 系统在对地面进行成像时一般采用单天线系统和双天线系统,所获取的原始数据有 2 种:一是地面目标区域的二维图像;二是地面目标反射回来的相位.原始数据经合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)处理后就可以得到高程和形变量等信息.合成孔径雷达干涉测量技术将传统的 SAR 技术与干涉测量技术相结合,通过 2 部保持某一恒定距离且相互独立的 SAR 天线对地面的同一区域进行成像,得到 2 幅满足一定相干条件的 SAR 图像后再通过干涉处理来获得数字高程模型(DEM)^[1].据预测,InSAR 将可能成为建立全球 DEM 的唯一有效技术^[1].利用 InSAR,可以对地球表面进行形变监测,且探测精度可达 cm 级或更高^[2].本文介绍了 D-InSAR 的基本原理和发展概况,综述了 D-InSAR 在地表形变监测中的应用现状,并对 D-InSAR 的应用前景进行了展望.

1 SAR 系统的发展

20 世纪 50 年代,合成孔径雷达(SAR)系统开始在美国军队中使用.后来,美国航空航天局(NASA)喷气推进实验室(JPL)和密执安环境研究所将 SAR 转为民用,并于 1972 年 4 月成功地进行了机载 L 波段的 SAR 实验,1978 年 6 月 28 日发射了第 1 颗合成孔径雷达卫星 SEASAT(L 波段,HH 极化)^[3].尽管这颗卫星的寿命只有 105 d,但它获得了大量高质量的数据.后来,JPL 实验室于 1981 年和 1984 年利用航天飞机成功地发射了 SIR-A(L 波段,HH 极化)和 SIR-B(L 波段,HH 极化,可变视角)卫星^[3].1994 年,该实验室又成功地发射了 SIR-C/X-SAR(L 波段、C 波段和 X 波段,多极化,多视角)卫星^[3].这些卫星主要用于环境监测和资源勘探等.

20 世纪 90 年代,SAR 系统进入了高速发展阶段,SAR 卫星也日渐增多.例如,欧洲空间局(ESA)1991 年 7 月 17 日发射了 ERS-1(C 波段,VV 极化)卫星,1995 年 4 月 21 日发射了 ERS-2(C 波段,HH 极化)卫星^[4];日本空间局(JSA)1992 年 2 月发射了 JERS-1(L 波段,HH 极化)卫星;加拿大 1995 年 11 月 4 日发射了第 1 颗商业化雷达卫星 RADARSAT^[4].加拿大发射的这颗雷达卫星的 SAR 系统为 C 波段、单极化(HH),可选用 25 种不同模式的波束,单视图像,分辨率可达 9 m,入射角 10°~60°可调,能较方便地进行旁轨立体成像(雷达摄影测量)和干涉测量^[5].

2 SAR 差分干涉测量技术(D-InSAR)

InSAR 是在 SAR 基础上发展起来的.1969 年,美国航空航天局(NASA)首先利用 InSAR 对火星和月球表

面进行了观测.1974年,Graham等提出了将InSAR用于地球表面制图的构想,并在机载X波段双天线SAR系统下通过InSAR获得了等高线图.1985年,美国航空航天局喷气推进实验室发表了其InSAR技术的研究成果^[3];1986年,Zebker等^[6]在旧金山海湾利用2个相距11.1m的SAR天线机载InSAR装置获得了高程精度为2~10m的测量结果;1988年,Goldstein等从机载雷达影像的观测应用转向了SEASAT SAR的应用,他们对相隔3d的SAR资料进行了干涉处理,并绘制了地形图.这些地形图与公开发表的美国地理测绘图相符.自从1991年欧洲空间局成功发射ERS-1卫星以来,人们利用ERS-1 SAR重复轨道资料对SAR干涉测量的可行性和精度进行了很多实验研究.特别是1995年4月ERS-2卫星发射后,由于ERS-1与ERS-2的卫星轨道距离很近,它们的SAR资料具有相隔仅1d的优点,使星载干涉测量得到了更广泛的应用.

D-InSAR是在InSAR基础上发展起来的差分干涉测量技术.1989年,Grabriel等首次论证了D-InSAR在cm级地表形变探测中的可行性,并利用SEASAT L波段SAR测量了美国加利福尼亚州东南部的英佩瑞尔河谷(Imperial Valley)灌溉区的地表形变^[5].但当时人们并没有对此给予足够的重视,直到1993年Massonnet等^[7]利用ERS-1 SAR数据获取了1992年的Landers山地震的形变场并将D-InSAR的测量结果与其他类型的测量数据进行了比较且获得了相当吻合的结果后,才引起国际地震界的关注.从此人们开始认识到D-InSAR技术在地表形变监测方面的优势.

SAR差分干涉测量技术(D-InSAR)是通过在同一地区的2幅干涉图像(其中一幅是从形变前的2幅SAR图像获取的干涉图像,另一幅是从形变前和形变后的2幅SAR图像获取的干涉图像)的差分处理(去除地球曲面和地形起伏的影响)来获取地表微量形变的.实验结果表明,利用D-InSAR可以探测到地面物体小于cm量级的位移变化.由于我国幅员辽阔,自然条件复杂,形变监测技术条件和能力非常有限,采用SAR差分干涉测量技术进行形变监测较为合适.

差分干涉测量技术所获取的不是离散点的信息,而是大面积的连续信息,故可以更好地反映地表形变信息.与传统测量技术相比,差分干涉测量技术覆盖范围更大,成本更低,空间分辨率更高,可以监测或识别潜在或未知的地面形变信息,可以全天候工作.因而,该技术在获取空间连续地表位移场方面具有非常大的应用潜力,是获取形变信息不可缺少的手段.目前,D-InSAR已表现出良好的技术优势,随着干涉雷达系统和相应数据处理的发展和完善,D-InSAR的应用领域将会继续扩大.

3 D-InSAR在地表形变监测中的应用

由于D-InSAR能获得cm级甚至mm级的高精度三维形变信息,因此该技术可用于地球表面形变场(包括地震、火山活动、冰川漂移、地面沉降及山体滑坡等引起的地表位移)的监测.早期D-InSAR主要用于探测形变比较明显的地震和火山活动,随着该技术的不断成熟和研究的不断深入,其应用重点已逐渐转移到地面沉降和山体滑坡等微小地形变化领域.

3.1 D-InSAR在地震研究中的应用

目前,地震灾害监测主要依赖于GPS技术、VLBI技术、SLR技术以及水准测量、应力测量和张力测量等方法,而这些技术和方法只能有选择性地用于一些离散的监测站点.具有高分辨率、连续空间覆盖和高精度等特征的D-InSAR为与地震有关的形变监测提供了一种新的技术,并且已应用于同震、震后和抗震构造的机理研究.

1993年,Massonnet等^[7]首先将InSAR应用于地震形变测量,他们利用间隔几个月的欧洲遥感卫星ERS-2/1 SAR图像测量了美国Landers地震的同震形变场,并得到了这次地震前后的SAR干涉条纹图像,且该图像与野外观测到的断距、地表形变及弹性位错模型结果相吻合.1994年,Zebker等发表了利用这一技术对该地区震后位移进行测量的研究成果^[8].这些研究结果表明,利用D-InSAR测得的震后位移精度与常规野外精密测量结果的精度一致.1994年,Murakami等^[4]利用JERS-1卫星分别于1993年4月30日和1994年6月14日获取的合成孔径雷达干涉图像绘制了1994年1月17日加利福尼亚州北岭6.7级地震的同震地壳形变图,其干涉条纹反映了该地区的同震位移,所得结果与GPS测量结果相差不到3.5cm.这进一步说明了该技术在地震研究中的潜力.

3.2 D-InSAR在地面沉降监测中的应用

地面沉降和滑坡引起的地表形变,无论是范围还是形变量,都要比地震和火山引起的地表形变小得多,

因此用 D-InSAR 进行地面沉降和滑坡引起的地表形变监测是比较困难的.但已有研究表明,利用该技术进行大范围地表沉降监测是可行的.1994 年,Carnece 等利用 D-InSAR 进行了地面沉降监测^[7].1997 年,Biegert 等利用不同卫星的合成孔径雷达数据对美国加利福尼亚州 Belridge 山和 Lost 山油田的地面沉降进行了研究,结果显示,70 d 内地面沉降了 6 cm.此结果与常规测量方法测量结果(每年 30 cm 的地面沉降速率)相吻合^[9].

3.3 D-InSAR 在火山活动监测中的应用

D-InSAR 在火山活动监测中的应用主要体现在火山喷发前地表形变过程的精确监测方面.如意大利的维苏威火山(Vesuvius)成像,获取的 SAR 图像主要用于 DEM 的建立,目的是以此分析火山坡度分布以及厚度和宽度,并提出灾害预防措施.1995 年,Massonnet 等^[7]利用 D-InSAR 测量数据研究了埃特拉火山的形变.1997 年,Briole 等以埃特拉火山作为研究对象,利用 ERS-1 卫星 1992 年 5 月~1993 年 10 月的 SAR 图像序列研究了 1986 年、1987 年和 1989 年埃特拉火山多次爆发所造成的地表形变(主要是下沉)^[4].上述研究表明,在火山活动监测中,D-InSAR 比常规测量手段更具优势.

4 结 束 语

D-InSAR 作为一种新型的空间对地观测技术,已成为雷达遥感研究的热点.目前,与 InSAR 相关的算法、处理软件及硬件都能满足实际应用的需要,但利用 InSAR 探测地表形变的精度仍需进一步提高.此外,SAR 图像数据质量也较差.由于数据源主要是在重复轨道情况下得到的,所获取的 SAR 图像数据会受到卫星漂移、飞行姿态变化及一定周期内地表物性变化等因素的影响,因而会降低 2 幅图像之间的相关性,影响干涉测量.但是,随着 SAR 系统的逐步完善以及信号处理算法的不断成熟,SAR 数据资源将变得更加丰富,InSAR 也将更加实用化,InSAR 的应用领域会越来越广.

参考文献:

- [1] ZEBKER H A, GOLDSTEIN R M. Topographic mapping from interferometry synthetic aperture radar observation[J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91: 4993—4999.
- [2] FUJIWARA S, ROSEN P A. Crustal deformation measurements using repeat-pass JERS-1 synthetic radar interferometry near the Izu Peninsula, Japan[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103: 2411—2426.
- [3] 舒宁. 雷达影像干涉测量原理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003. 3—10.
- [4] 乔书波, 李金岭, 孙付平, 等. InSAR 技术现状与应用[J]. 天文学进展, 2003, 21(1): 11—25.
- [5] 廖明生, 林琨. 雷达干涉测量学: 原理与信号处理基础[M]. 北京: 测绘出版社, 2003. 18—22.
- [6] ZEBKER H A, ROSEN P A, GOLDSTEIN R M, et al. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: the landers earthquake[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(B10): 19617—19634.
- [7] MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C, et al. The displacement field of the landers earthquake mapped by radar interferometry[J]. Nature, 1993, 364: 138—142.
- [8] 王超, 刘智, 张红, 等. 张北—尚义地震同震形变场雷达差分干涉测量[J]. 科学通报, 2000, 45(23): 2550—2555.
- [9] 张宏栓, 纪占胜. 合成孔径雷达干涉测量(InSAR)在地面形变监测中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1): 112—117.

Differential SAR interferometry and its application to monitoring of earth surface deformation

ZHOU Jian-min, HE Xiu-feng

(Institute of Satellite Navigation & Spatial Information System of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract The Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (D-InSAR) extracts the 3-D earth surface information and its variation from the phase information of SAR, and can detect the little variation of earth and ice surface. The accuracy of displacement monitoring with the technique can reach up to cm-level or even better. In this paper, an introduction was given to the basic principle of D-InSAR, the general situation of its development, and its application to earth surface deformation monitoring. Finally, the further development and application of D-InSAR were discussed.

Key words InSAR; D-InSAR; earth surface deformation; remote sensing