

GPS 与 INSAR 数据融合研究展望

许才军¹ 王 华¹ 黄劲松¹

(1 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要: 分析了 GPS 与 INSAR 数据融合的必要性及可行性, 讨论了 GPS 与 INSAR 数据融合存在的主要问题, 进一步探讨了利用 GPS 数据改善 INSAR 相位解缠算法, 利用 GPS 与 INSAR 数据融合建立水汽模型和大气层延迟误差改正模型, 以及 GPS 高时间分辨率和高平面位置精度与 INSAR 高空间分辨率和高高程变形精度有效统一的问题。

关键词: GPS; INSAR; 误差改正; 数据融合

中图法分类号: P228.41

1 GPS 与 INSAR 数据融合的可行性

合成孔径雷达干涉测量技术(简称 INSAR)最早应用于金星雷达回波模糊度的消除^[1], 后来应用于月球地形图的绘制^[2]。Graham 于 1974 年首次将 INSAR 引入地形制图, 并首次利用 INSAR 绘出了与地形图相应的等值线^[3]。INSAR 理论成熟于 20 世纪 80 年代, 为了满足 SAR 图像相干性条件, Zebker 和 Goldstein 首次应用交叉轨道干涉测量模式绘制出地形图^[4]。Goldstein 和 Zebker 应用平行轨道干涉测量模式获取了旧金山海湾地区的潮汐移动图像^[5]。重复轨道干涉测量模式最早于 1987 年被 Li 和 Goldstein 采用, 特别是随着星载雷达技术的发展, 重复轨道模式显示了广阔的应用前景。INSAR 早期主要应用于三维地形图的生成, Gabriel 等首先应用差分 INSAR 技术(简称 DINSAR)获取了 cm 级精度的地表形变信息, 显示了 DINSAR 在形变监测中的优越性, 从而引起了人们更加广泛的关注^[6]。1991 年, 欧洲遥感卫星 ERS-1 的发射使得 INSAR 开始蓬勃发展(Li and Goldstein, 1990; Coulson, 1993); 1995 年 ERS-2 卫星的发射掀起了雷达遥感的热潮, 利用 ERS-1 和 ERS-2 获取的图像

组合, 可以得到采样周期为 1d 的 INSAR 图像数据。2000 年 2 月 11 日美国“奋进号”航天飞机全球雷达测绘的成功, 更是引起了广泛关注, 它仅用了 11d 就完成了一次飞行, 获取了覆盖全球陆地表面 80% 面积的三维地形图, 充分展示了 INSAR 全球快速测图的能力。

INSAR 是一种极具潜力的新型空间大地测量方法, 但它也有其固有的限制, 特别是受到大气层延迟(对流层延迟、电离层延迟等)、卫星轨道误差、地表状况和时变去相关性等影响, 很容易导致 INSAR 图像解释错误, 而 INSAR 数据本身无法解决所存在的上述问题。而 GPS 可以精密定位, 可以较为精确地确定电离层、对流层参数, 是当前应用最广泛的一种空间大地测量手段。比较 INSAR 与 GPS 两种技术, 可知两者具有很好的互补性: ①GPS 是一种理想的点定位系统, 尤其是采用相对定位工作方式时, 定位精度达 $10^{-8} \sim 10^{-9}$, 但是 GPS 的空间分辨率较低, 用于监测地表形变的 GPS 网基线长度至少有几十至几百 km, 不足以满足高空间分辨率形变监测的需求。而 INSAR 提供的是整个区域面上的连续信息, 其空间分辨率甚至可以达到 $20\text{m} \times 20\text{m}$ 。②GPS 获得的是高精度的绝对坐标, 而 INSAR 仅提供相对坐标。③由于入射角的关系, INSAR 对高程信息特别敏感, 尤其是利用 DINSAR 进行形变监测,

收稿日期: 2003-03-25。

项目来源: 湖北省青年杰出人才基金资助项目(2002AC011); 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放研究基金(测绘基础研究)资助项目(02-09-06)及武汉大学创新基金资助项目。

精度可达亚 cm 级,而这恰恰是 GPS 最薄弱的一环。④最重要的是, GPS 允许长时间连续观测,而 INSAR 可被看作瞬时观测,而且容易受时变去相关的影响,两幅图像获取时间间隔不能太长; GPS 可提供时间分辨率很高的观测数据(采样率为 10Hz 乃至 20Hz),而 SAR 卫星通常 35d 左右的重复周期(ERS-1 和 ERS-2 共同服役期间,重复周期为 1d)很难提供足够的时间分辨率。

GPS 与 INSAR 数据融合既可以改正 INSAR 数据本身难以消除的误差,又可以实现 GPS 技术高时间分辨率和高平面位置精度与 INSAR 技术高空间分辨率和高高程变形精度的有效统一。

2 GPS 与 INSAR 数据融合存在的主要问题

1997 年, Bock & Williams^[7] 首先提出 INSAR 与 GPS 融合的思想; 同年, Linlin Ge 等人(1997, 1999, 2000a, 2000b)进一步提出了 DIDP (double interpolation and double prediction) 方法, 即利用 GPS 数据减弱大气层延迟影响(对流层延迟、电离层延迟等)和卫星轨道误差, 并通过改正后的 INSAR 图像去加密 GPS 观测结果, 在时间域内拟合 GPS 数据, 在空间域内拟合 INSAR 数据, 从而实现高精度、高时空分辨率的形变监测。2000 年, Sverrir Guemundsson 结合 GPS 与 INSAR 数据, 应用马尔可夫随机模型和模拟退火法进行干涉图像相位解缠, 并初步实现了 INSAR 与 GPS 数据的融合, 得出了高空间分辨率的三维地壳变形场^[8]。Hoeven 等分别采用了内插 GPS 网中获取的数据和 GPS 时间序列两种方法建立对流层延迟改正模型来改善 INSAR 数据, 并对这两种方法作了比较与分析^[9]。

目前, 利用 INSAR 可以获得高分辨率(20m × 20m)、高精度(可达 6m)的数字高程模型(DEM)(Bamler 等, 1998; Werner 等, 1993; Adam 等, 1999; Jordan 等, 1996)。利用 DINSAR 可以探测高分辨率(20m × 20m)、高精度(可达亚 cm 级)的地表形变信息, 自 1989 年, Gabriel 等(1989)将 DINSAR 应用于监测地表移动至今, DINSAR 已被用于多例地震^[11~13]、火山活动的形变(Mouginis-Mark 等, 1993; Briole 等, 1997; Thatcher, Massonnet, 1997; Gaddis 等, 1998)、冰川冰盖移动(Goldstein 等, 1993; Gray 等, 1999)、热带雨林监测(Wegmuller, Werner, 1995)、滑坡监测(Fruneau 等, 1996)及地表沉降观测(Rosen 等,

1997; Usai, 1997; Usai, Hanssan, 1997; Hassen, Usai, 1997; Usai, Klees, 1998, 1999a, 1999b; Ferretti 等, 1998, 1999b, 2000)等。利用 INSAR 或 INSAR 与 GPS、VLBI、雷达高度计、气象科学等集成进行大气层研究, 是当前国际研究的一个热点。Hanssen 等(1999, 2000b, 2001, 2002)在这方面做了大量的研究工作, 并初步得出了利用 INSAR 研究水汽的模式^[15]。

INSAR 作为一种监测手段, 也有其固有的限制, 其数据质量主要受到 SAR 卫星轨道误差、系统热噪声去相关、多普勒质心去相关、空间基线去相关、地面散射去相关、时变去相关、大气层延迟误差、地形畸变、数据处理过程噪声等因素影响。欧空局发射的 ERS-1 和 ERS-2 卫星从荷兰 Delft 大学空间对地观测研究组(DEOS)获取精密星历减小轨道误差(Fernandes, 1993; Seeber, 1993; Scharroo, Visser, 1998), 其他 SAR 卫星系统的轨道星历精度稍低。对于某一特定的系统, 系统热噪声对相位的影响可以通过信噪比值(SNR)来确定^[16 17]。由于卫星和地面点的相对运动, 雷达发射的微波信号会产生多普勒频移, 多普勒质心去相关是由于 INSAR 两次获取图像时多普勒质心不同引起的, 对于 ERS-1 和 ERS-2 组合得到的干涉图像, 多普勒质心去相关的影响非常明显(Swart, 2000)。多普勒去相关一般可以通过方位向滤波消除。INSAR 两次获取图像时, 如果地面散射特性发生了变化会导致地面散射去相关, Zebker 和 Villasenor 首先给出了散射去相关对地面变形量影响的关系式^[19]。INSAR 两次获取地面图像时, 天线倾角的不同可能导致空间基线去相关(Gatelli 等, 1994), 当垂直基线超过一定的限制时, 甚至会导致两幅图像完全去相关, 目前一般依据基线长度选择合适的干涉像对来消除基线去相关的影响。数据处理过程中, 噪声主要是由数据处理所采用的计算机系统字长限制和算法产生的, 如不同插值方法、不同的相位解缠算法等都会对结果产生很大的影响^[18]。时变去相关主要是由于 INSAR 两次获取图像时地表覆盖物的属性变化引起的, 特别是进行长期地表形变监测, 必须考虑时变去相关的影响(Hoen, Zebker, 2000)。INSAR 时间序列数据库方法^[19]和永久性散射方法^[20]是削弱时变去相关影响所采用的两种新方法。随时间和空间变化, 大气层分布的不均匀性会导致大气层延迟误差(Tarayre, Massonnet, 1994, 1996)。由于大气层分布的复杂性, 特别是对流层延迟湿分量的不确定性, 大气层延迟误差

很难精确确定。目前,减弱大气层延迟误差主要采用的方法包括利用 INSAR 图像建立水汽模型 (Goldstein, 1995; Zebker 等, 1997)^[15, 18] 和利用 GPS 数据计算的大气层延迟误差 (Hoeven 等, 2000; Tarayre, Massonnet, 1996; Linlin Ge, 1997) 对 INSAR 数据进行改正。

从上面的分析可知, GPS 与 INSAR 数据融合还存在以下主要问题。目前的研究都只偏重 INSAR 数据中某一误差利用 GPS 数据进行改正, 而没有一套完整的 GPS 与 INSAR 数据融合的理论、方法; 相位解缠算法对 INSAR 产品的精度影响很大, 但目前研究都没有提供完善的解缠算法; 建立大气层延迟误差模型, 目前研究都只应用了 GPS 数据, 而没有用到 INSAR 数据。虽然 GPS 数据能建立高精度的大气层延迟模型, 然而它却只能提供点信息, 模型中空间插值技术的引入无疑又会导致数据精度降低; 利用 GPS 数据拟合地表形变场时, 插值算法中需要同时顾及地壳运动, 并且还需要考虑 GPS 与 INSAR 数据融合的精度评定问题。

3 GPS 与 INSAR 数据融合的展望

GPS 与 INSAR 数据融合可以进行以下几方面的研究工作。

3.1 用 GPS 数据改善 INSAR 相位解缠算法

研究 GPS 技术测得的角反射器的精确三维坐标转换成绝对相位值的算法, 改进枝状缺口算法, 利用 GPS 得到的绝对相位值来选取最优积分路径, 利用 GPS 得到的绝对相位值确定枝状缺口解缠中孤岛之间的解缠相位关系。

3.2 利用 GPS 与 INSAR 数据融合建立水汽模型和大气层延迟误差改正模型

1) 采用 GPS 获得高精度和高时间分辨率的离散大气参数 (PWV 和 TEC)。利用分布一定范围内的 GPS 地面站采集双频观测数据; 采用参数估计方法, 估算出获取相干雷达影像期间的地面站天顶方向的大气可降水汽 (PWV) 的绝对值及其时变量, 这些量在空间分布上是离散的; 利用双频 GPS 观测值计算出各电离层穿刺点 (IP) 处天顶方向上的电离层延迟, 从而获得这些地点垂直方向上的总电子含量 (VTEC), 采用内插算法, 建立出覆盖区域的初步 TEC 模型。

2) 采用 INSAR 数据获得以上大气参数的高精度空间分布特征。利用相干雷达影像, 假定地面地形在获取相干雷达影像期间保持不变, 从相

干影像中提取大气 PWV 和 TEC 在此期间变化的高精度空间分布信息。采用此方法获得的结果虽然能获得良好的 PWV 和 TEC 变化的空间分布情况, 却无法获得这些量的绝对值及其详细的时变信息。

3) 数据融合处理分析, 建立高精度、高时空分辨率的大气水汽和 TEC 模型。将通过以上 GPS 和 INSAR 两种方法获得的大气 PWV 和 TEC 两种数据进行融合处理分析, 采用估计两方面信息的内插算法, 建立出高精度、高时空分辨率的 PWV 和 TEC 模型。

3.3 探讨 GPS 与 INSAR 数据在时间域与空间域的融合模型和算法

顾及地壳运动模型, 联合地震、活断层滑动率资料和地球物理资料参数, 根据 CGPS 测得的精确离散的形变信息, 采用适当的插值方法 (如双三次样条函数, Holt 等, 2000) 建立三维的地表形变场模型。

结合经过 GPS 数据改正相位误差后的 INSAR 结果和由 GPS 联合地球物理资料建立的形变场模型, 按照最小二乘准则, 确定高空间分辨率的形变场。

根据 GPS 观测的形变时间序列数据, 应用自适应滤波方法, 对每一测站的东向、北向和高程方向分别建立形变量的动态模型。

依据 GPS 时间序列建立的动态模型和 GPS 与 INSAR 数据联合处理得到的瞬时形变场, 采用插值算法, 计算 INSAR 图像上其他点的时间序列, 然后应用卡尔曼滤波方法往前滤波预测所有点位在某一时刻的形变量。

3.4 推导 GPS 与 INSAR 数据融合模型的精度评定公式, 研究数据融合的实际效果

分析 GPS 和 INSAR 数据中存在的各种误差及其传播规律, 特别是大气层延迟误差和相位解缠误差的特性及其传播规律, 通过建立 GPS 与 INSAR 数据融合模型, 从理论上推导精度评定公式, 并结合实际数据及计算结果研究数据融合的实际效果。

参 考 文 献

- 1 Rogers A E E, Ingalls R P. Venus: Mapping the Surface Reflectivity by Radar Interferometry. *Science*, 1969, 165: 797~799
- 2 Zisk H. A New Earth-based Radar Technique for the Measurement of Lunar Topography. *Moon*, 1972, 4: 296~300

- 3 Graham L C. Synthetic Interferometric for Topographic Mapping. Proc. IEEE, 1974, 62: 763 ~ 768
- 4 Zebker H A, Goldstein R M. Topographic Mapping from Interferometric SAR Observations. J. Geophys. Res., 1986, 91: 4 993 ~ 4 999
- 5 Goldstein R M, Zebker H A. Interferometric Radar Measurement of Ocean Surface Currents. Nature, 1987, 328: 707 ~ 709
- 6 Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry. J. Geophys. Res., 1989, 94: 9 183 ~ 9 191
- 7 Bock Y, Williams S. Integrated Satellite Interferometry in Southern California. EOS Trans., AGU, 1997, 78
- 8 Sverrir Guemundsson, Crustal Deformation Mapped by Combined GPS and InSAR; [M. S. Thesis]. Iceland: Technical University, 2000
- 9 Hoeven A, Hanssen R F, Ambrosius B. Cross-Validation of Tropospheric Delay Variability Observed by GPS and SAR Interferometry. GPS Nieuw sbrief 2000, 2(15): 2 ~ 7
- 10 Bamler R, Hartl P. Synthetic Aperture Radar Interferometry. Inverse Problem, 1998, 14: 1 ~ 54
- 11 Assonnet D, Rossi M, Carmona C. The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry. Nature, 1993, 364: 138 ~ 142
- 12 Ozawa S, Murakami M, Fujiwara S, et al. Synthetic Aperture Radar Interferogram of the 1995 Kobe Earthquake and Its Geodetic Inversion. Geophys. Res. Lett., 1997, 24(18): 2 327 ~ 2 330
- 13 Sandwell D T, Sichoix L, Agnew D, et al. New Real-time Radar Interferometry of the Mw 7. 1 Hector Mine Earthquake. Geophys. Res. Lett., 2000, 27(19): 3 101 ~ 3 104
- 14 Goldstein R M, Engelhardt H, Kamp B, et al. Satellite Radar Interferometry for Monitoring Ice Sheet Motion: Application to an Antarctic Ice Stream. Science, 1993, 262: 1 525 ~ 1 530
- 15 Hanssen R F, Weckwerth T M, Zebker H A, et al. High-Resolution Water Vapor Mapping from Interferometric Radar Measurements. Science, 1999, 283: 1 295 ~ 1 297
- 16 Zebker H A, Villasenor J. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes. IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 1992, 34: 950 ~ 959
- 17 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. Geophys. Res., 1994, 99: 19 617 ~ 19 643
- 18 Hanssen R F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis; [Ph. D Thesis]. Delft: Delft University of Technology, 2001
- 19 Usai S. A New Approach for Long Term Monitoring of Deformations by Differential SAR Interferometry; [Ph. D Thesis]. Netherland: 2001
- 20 Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent Scatters in SAR Interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8 ~ 20
- 21 Li F, Goldstein R M. Studies of Multi-baseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1989, 28(1): 88 ~ 97
- 22 Price E J, Sandwell D T. Small-scale Deformations Associated with the 1992 Landers California Earthquake Mapped by Synthetic Aperture Radar Interferometry Phase Gradients. J. Geophys. Res., 1998, 103: 27 001 ~ 27 016
- 23 Roland Bürgmann, Paul A, et al. Fielding Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation. Annu. Rev. Earth Planet. Science, 2000, 28: 169 ~ 209
- 24 Gens R. Quality Assessment of SAR Interferometric Data; [Ph. D Thesis]. Hannover: 1998
- 25 Rosen P A, Hensley S, et al. Synthetic Aperture Radar Interferometry. IEEE, 2000
- 26 Ge L, Han S, Rizos C. The Double Interpolation and Double Prediction (DIDP) Approach for InSAR and GPS Integration. IAPRS, 2000, XXXIII
- 27 Ge L. Development and Testing of Augmentations of Continuously-operating GPS Networks to Improve their Spatial and Temporal Resolution; [Ph. D Thesis]. Australia; UNSW, 2001
- 28 金双根, 朱文耀. GPS 观测数据提高 InSAR 干涉测量精度的分析. 遥感信息, 2001, 8 ~ 11
- 29 单新建, 马 瑾. 利用差分干涉雷达测量技术(D-InSAR) 提取同震形变场. 地震学报, 2002, 24(4): 413 ~ 420
- 30 王 超, 张 红, 等. 雷达差分干涉测量. 地理学与国土研究, 2002, 18(3): 13 ~ 13
- 31 张 红, 王 超, 刘 智. 获取张北地震同震形变场的差分干涉测量技术. 中国图像图形学报, 2000, 5 (A6): 497 ~ 500
- 32 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. 科学通报, 2000, 45(23): 2 550 ~ 2 553

第一作者简介: 许才军, 教授, 博士, 博士生导师。现主要从事大地测量和地球动力学及大地测量地球物理反演研究。

E-mail: cjxu@sgg.wtustm.edu.cn

(下转第 78 页)

参 考 文 献

- 1 石 磐. 我国重力场和大地水准面的精化. 黄山大地测量年会, 1995
- 2 Molodensky M S, Eremeev V F, Yurkina M I. Methods for Study of the External Gravitational Field and Figure of the Earth. Israel Prog. Sci. Translations, Jerusalem, 1962
- 3 陆仲连. 大地重力学. 解放军测绘学院, 1981
- 4 Moritz H. Advanced Physical Geodesy. Herbert Wichmann Verlag, 1980
- 5 大地测量学科发展战略研究组. 自然科学学科发展战略研究报告——大地测量学, 1993

第一作者简介: 吴晓平, 教授. 主要研究方向: 空间大地测量与地球重力场逼近.

Problem of the Boundary Value of Disturbing Gravity and Practical Data Processing

WU Xiaoping¹ LI Shanshan¹ ZHANG Chuanding¹

(1 Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, 66 Longhai Road, Zhengzhou, China, 450052)

Abstract: This paper discusses the problem of gravity field determination by application of such a new gravity boundary condition as the disturbing gravity by use of GPS.

Key words: GPS; gravity anomaly; disturbing gravity

About the first author: WU Xiaoping, professor. His research interests are space geodesy and gravity field approximation

(上接第 61 页)

Prospect on the Integration of GPS and INSAR Data

XU Caijun¹ WANG Hua¹ HUANGJinsong¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract: The necessity and feasibility of GPS and INSAR data integration are analyzed. The error correction in INSAR data by GPS measurements is presented, including orbit error, coregistration error, phase unwrapping error, DEM creation error, temporal decorrelation, and tropospheric delay error. The integration of GPS and INSAR data in both time and spatial domains by interpolation and filtering is discussed.

Key words: GPS; INSAR; error correction; data integration

About the first author: XU Caijun professor, Ph. D. Ph. D supervisor. His interested fields include geodesy and geophysics inversion geodesy and geodynamics.

E mail: cjxu@sgg.wtusm.edu.cn