

合成孔径雷达干涉测量大气改正研究综述

孙广通^{①②}, 张永红^①, 吴宏安^①

(^① 中国测绘科学研究院, 北京 100830; ^② 防灾科技学院, 河北三河 065201)

摘要:随着 InSAR 技术的飞速发展, 大气影响对其应用的限制越发明显。近些年, 国内外对 InSAR 大气改正的方法进行了大量的研究。本文在分析 InSAR 测量中的大气影响及其误差的基础上, 对当前利用 GPS、MODIS、MERIS、FY 等外部数据, 进行 InSAR 大气改正的主要方法进行了详细介绍, 并对几种方法进行了综合比较和评价, 分析了每种方法的优势和不足, 最后对今后进一步研究的多星协同的综合大气改正方法进行了展望。

关键词: InSAR; 大气改正; GPS; MODIS; MERIS; FY

doi: 10. 3969/ j. issn. 1000- 3177. 2011. 04. 022

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000- 3177(2011) 116- 0111- 06

Review of Atmospheric Correction Methods for Interferometric Synthetic Aperture Radar Measurements

SUN Guang-tong^{①②}, ZHANG Yong-hong^①, WU Hong-an^①

(^① Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830;

^② Institute of Disaster Prevention Science and Technology, Hebei Sanhe 065201)

Abstract: With the development of InSAR technology, its application is significantly limited by the atmosphere effects. Great efforts have been made in recent years to develop the methods for mitigating the atmosphere effects at home and abroad. Based on the analysis of atmospheric effects and errors in InSAR measurements, this paper introduces the major methods of atmosphere correction using exterior data, such as GPS, MODIS, MERIS, FY and so on. Then analyzes the advantages and disadvantages of each method by comparing and evaluating synthetically, and finally, puts forward the future research on atmospheric correction method using multiple satellite data.

Key words: InSAR; atmospheric correction; GPS; MODIS; MERIS; FY

1 引言

合成孔径雷达干涉测量技术(简称 InSAR)作为一种新的空间大地测量技术, 近些年得到了飞速的发展, 其在理论上可以获得非常精确的数字高程模型和毫米级的地表形变信息^[1], 目前已成为对地观测领域中一种重要的技术手段, 在地表三维重建、地球表面形变场探测及土地利用分类等领域都表现出极好的应用前景^[2]。

然而, 随着 InSAR 技术的深入研究, 虽然其测

量精度已有较大的提高, 但在实际应用中受一些因素的制约。一些研究表明, 影响 SAR 干涉测量的最重要因素是大气效应和时间去相干。易变的大气条件可能会导致不同的相位延迟, 这种不一致不仅表现在时间尺度上, 也表现在空间尺度上, 严重的大气延迟甚至会掩盖感兴趣的信号。Zebker 等研究指出, 就 SIR-C/X-SAR 而言, 当基线长在 100m 到 400m 之间时, 大气中相对湿度在时间和空间上 20% 的变化可以导致 10cm~ 14cm 的形变测量误差和 80m~ 290m 的高程误差^[3], 这大大限制了 In-

收稿日期: 2010- 06- 25 修订日期: 2010- 10- 12

基金项目: 国家 863 项目(2009AA12Z145); 国家自然科学基金(40571104); 国家 973 项目(2006CB701303) 中国测绘科学研究院, 基
本科研业务费(7771031)。

作者简介: 孙广通(1985~), 男, 硕士研究生, 摄影测量与遥感专业, 研究方向为合成孔径雷达干涉测量。

E-mail: sun-0312@163.com

SAR 技术的应用范围。随着 InSAR 技术研究的深入和应用的推广,如何有效去除大气影响成为一个关键问题。

国际上进行 InSAR 大气改正主要有 3 种方法:基于数据本身特性去除大气影响,即自身校正法;基于外部遥感数据的改正方法,即外部校正法;利用数值大气模型计算大气中的水汽分布^[4~5]。自身校正法的代表性方法有线性校正法^[6]、随机滤波法^[7]、相位积累法^[8]和永久性散射体方法^[9~10],但自身校正法存在所需数据量大、校正模型假设条件多、精度低等问题。高精度的大气改正,还是需要外部辅助数据。目前,可利用的外部数据主要为 GPS 数据^[11~14]、无线电探空数据^[15]、气象数据^[16]、MODIS 数据^[17~21]、MERIS 数据^[22~26]、FY 数据^[27~28]等。

本文首先分析了 InSAR 干涉相位中的大气影响,并对其引起的高程测量、形变测量误差进行分析,在此基础上对基于 GPS 观测的 InSAR 大气改正方法、GPS/MODIS 集成的 InSAR 大气改正方法、基于 MERIS 水汽产品的 InSAR 大气改正方法、MODIS/MERIS 集成的 InSAR 大气改正方法和基于 FY 水汽数据的 InSAR 大气改正方法进行了详细的介绍,并对几种方法进行了对比分析和评价,最后对今后进一步研究的多星协同的综合大气改正方法进行了展望。

2 InSAR 测量中的大气影响及其误差分析

2.1 InSAR 干涉相位的大气影响分析

在重复轨道干涉测量中,一个干涉像对的两幅影像中回波信号的相位可分别表示为^[29]:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \frac{4\pi}{\lambda}(R_1 + \Delta R_1) \\ \phi_2 &= \frac{4\pi}{\lambda}(R_2 + \Delta R_2) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, R_1, R_2 为 SAR 系统平台到地面像元的斜距; $\Delta R_1, \Delta R_2$ 为雷达信号穿过大气层时,由于气压、温度、水汽等原因造成的大气延迟; λ 为雷达波长。

根据雷达干涉原理,两幅影像的干涉相位为:

$$\varphi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda}(R_1 - R_2) + \frac{4\pi}{\lambda}(\Delta R_1 - \Delta R_2) \quad (2)$$

式中, $\frac{4\pi}{\lambda}(\Delta R_1 - \Delta R_2)$ 即为由大气延迟引起的干涉相位。如果两次观测的大气条件完全相同,则大气延迟的附加路径差为 0,然而,只要不是完全同时观测,就不能保证大气条件完全相同,需要研究大气对信号传播的影响。

已有研究表明^[3],这种大气影响主要是由大气中水汽变化引起的。表示大气中水汽状况的物理量一般为可降水汽含量 PWV(Precipitable Water Vapor),它可以通过现有的空基监测系统(MODIS、MERIS、FY 等)直接获得,MODIS、MERIS 的 PWV 精度在 1.6mm~2mm 左右,可降水汽与天顶湿延迟 ZWD(Zenith Wet Delay)存在如下的转换关系:

$$\begin{aligned} ZWD &= \left[10^{-6} \rho_w \cdot \left(k' + \frac{k}{T_M} \right) \cdot R_v \right] \cdot PWV \\ &= \Pi \cdot PWV \end{aligned} \quad (3)$$

其中 k' 和 k 是折射常数, ρ_w 是液态水密度, T_M 是对流层的加权平均温度, R_v 是特定的大气常数。比例因子 Π 是一个无量纲,通常数值范围为 6.0~6.5。对于 ZWD 和 PWV 之间的粗略转换,可以采用一个平均的转换因子 6.2。

对于侧视成像雷达,由水汽引起的总的双程相位延迟可以简单地表示为:

$$\Delta \varphi = \frac{4\pi ZWD}{\lambda \cos \theta} \quad (4)$$

其中 $\Delta \varphi$ 表示相位平移, ZWD 为水汽引起的天顶湿延迟, θ 为雷达入射角。

对于重复轨道 InSAR 来说,干涉图的相位是两幅 SAR SLC 影像的相位差,假设每次 ZWD 测量值的标准差为 σ_{ZWD} , Emardson 证明了时间间隔大于一天的两幅 SLC 影像的 ZWD 是不相关的^[7],根据误差传播定律,由式(4)可以得到 ZWD 对干涉图的影响为:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{4\sqrt{2}\pi}{\lambda} \frac{1}{\cos \theta} \sigma_{ZWD} \quad (5)$$

对于 ERS-1/2 而言,雷达波长 λ 为 56.6mm,入射角 θ 范围为 19.35°~26.50°,10mm~12mm 的 ZWD 误差可引起干涉图 0.52~0.67 个条纹变化。

2.2 大气影响引起的高程测量误差分析

对于重复轨道 InSAR 地形测图来说,高程和相位之间的关系可表示为:

$$h = - \frac{\lambda R \sin \theta}{4\pi B_{\perp}} \varphi \quad (6)$$

由式(5)与式(6)可推导出高程误差和 ZWD 误差之间的关系:

$$\sigma_h = \frac{\lambda R \sin \theta}{4\pi B_{\perp}} \sigma_{\varphi} = \frac{\sqrt{2} \cdot R \cdot \tan \theta}{B_{\perp}} \sigma_{ZWD} \quad (7)$$

对于 ERS-1/2 而言,入射角 θ 范围为 19.35°~26.50°,当斜距 R 为 780km,垂直基线为 200m 时,10mm~12mm 的 ZWD 误差引起的高程误差为 19m~33m。

2.3 大气影响引起的形变测量误差分析

根据 D-InSAR 反演形变的原理, 视线向形变误差和相位误差的关系可表示为:

$$\sigma_{\Delta\rho} = \frac{\lambda}{4\pi} \sigma_{\phi} \quad (8)$$

由式(5)和式(8)可以得到视线向形变误差和 ZWD 误差的关系:

$$\sigma_{\Delta\rho} = \frac{\sqrt{2}}{\cos\theta} \sigma_{ZWD} \quad (9)$$

对于 ERS-1/2 而言, 入射角 θ 范围为 $19.35^\circ \sim 26.50^\circ$, 10mm~12mm 的 ZWD 误差引起的形变估计误差为 15mm~19mm。

3 InSAR 大气改正的主要方法及对比分析

InSAR 大气改正主要是对大气中水汽造成的延迟进行改正。卫星遥感技术是获取全球高空间分辨率水汽分布最有效的途径。目前, MODIS、MERIS、FY 等都提供了水汽产品, 从而可以直接获取可降水汽 PWV 值, GPS 观测数据通过转换也可以计算出相应的 PWV 值。利用(3)式, 我们可以将 PWV 值转换为 ZWD 值, 按照干涉图的两幅影像获取时间对相应的 ZWD 值进行差分, 获得天顶延迟差分图 ZPDDM (Zenith Path Delay Difference Map)。为了去除云和噪声的影响, 使其分辨率与干涉图一致, 还需对 ZPDDM 做低通滤波处理并插值采样到干涉图空间。最后将插值滤波后的 ZPDDM 映射到雷达视线方向, 并转换成相位, 就得到了 InSAR 大气延迟相位改正图, 以此来去除对应干涉图上的大气影响。

3.1 基于 GPS 观测的 InSAR 大气改正方法

InSAR 信号受大气影响与 GPS 相似, 而 GPS 在探测大气方面的技术逐渐成熟和完善, 所以对连续观测的 GPS 数据利用专门的软件(如 Gamit)处理, 估计不同时刻的天顶湿延迟 ZWD, 按照干涉图的两幅影像获取时间对相应的 ZWD 值进行差分, 得到 ZPDDM, 以此来改正相应干涉图中大气影响。

GPS 获得的 ZWD 的空间分辨率远低于 SAR 影像分辨率, 为了对 SAR 影像进行逐像素的大气延迟改正, 必须对 GPS 获取的 ZWD 进行内插。目前对 GPS-ZWD 内插效果比较好的算法是地形扰动模型^[14], 即 GTTM (GPS Topography-dependent Turbulence Model), 其最大特点是考虑了与地形相关的大气水汽的影响。GTTM 模型基于以下两个假

设: ①大气水汽的时空变化总体上具有扰动性; ②大气水汽的空间分布在一定程度上与地表地形相关。

利用 GPS 探测大气水汽含量, 与以往的探测水汽技术相比, 具有探测精度高, 单点探测的可降水汽精度在 1mm 左右, 时间分辨率高(30s)^[30], 可获得连续水汽变化资料, 能够全天候获取数据, 不受云雨天气影响, 且观测稳定, 无需校准等优点。但基于 GPS 观测的 InSAR 大气改正方法在应用上还存在一定的限制因素, 主要是由于目前 GPS 监测网络密度不够, 覆盖范围有限, 空间分辨率低。即使目前密度最大的美国南加州 GPS 网, 其测站间距也从几千米到几十千米不等, 因此, 站点之间的数据需要内插, 进而降低了改正精度。

3.2 GPS/MODIS 集成的 InSAR 大气改正方法

MODIS 可以获取全球较高空间分辨率(1km×1km)的水汽产品 MOD5_L2^[31], 且可免费下载。搭载有 MODIS 传感器的 Terra 卫星在地方时上午 10:30 左右通过赤道的降交点, 与 ERS、ENVISAT 卫星通过的时间很接近, 仅与 ERS 相差一个小时, 与 ENVISAT 相差半个小时左右, 为利用 MODIS 水汽产品(由近红外算法生成^[19], 包括像元级的柱体水汽量和相关的质量保证参数, 这些参数给出了一些与水汽产品相关的信息, 比如每个像元的大地经纬度、太阳天顶角、传感器方位角、水汽改正因子和云掩模产品等)进行大气改正提供了前提条件。

由于 MODIS 水汽数据与 ERS1/2、ASAR 等数据并不完全同步, 在利用 MODIS 水汽产品进行大气改正前, 需要利用少量 GPS 数据对 MODIS-PWV 值进行校准。相关研究表明, 与 GPS-PWV 相比, MODIS-PWV 高估了水汽量, 但整体与 GPS-PWV 成线性分布关系, 其比例因子约为 1.05~1.20^[17-18]。

由 GPS 校准 MODIS 水汽产品的主要步骤为: ①利用 MODIS 云掩模产品探测出不受云影响的 MODIS 可降水汽, 即 MODIS-PWV; ②通过比较无云条件下 MODIS-PWV 值和 GPS-PWV 值, 得到一线性改正模型; ③利用改正模型对 MODIS-PWV 进行校准; ④利用内插模型(如 IIDW 内插)对校准后的 MODIS-PWV 进行内插, 填补云覆盖区的数据漏洞; ⑤比较云覆盖区的 MODIS-PWV 内插值与 GPS-PWV 估计值, 证实内插水汽值的有效性。

GPS/MODIS 集成的 InSAR 大气改正方法效果明显, InSAR 得到的形变量与 GPS 形变量之间的中误差由改正前的 11mm 降到 5mm^[17]。

3.3 基于 MERIS 水汽产品的 InSAR 大气改正方法

MERIS 是欧空局 2002 年 3 月 1 日发射的 ENVISAT 卫星上搭载的一种传感器, 由于其与 ASAR 位于同一卫星平台, MERIS 与 ASAR 可以全天时段的同时采集数据, 保持很好的时间同步性和路径一致性。MERIS 2 级产品 MER_FR__2P 与 MER_RR__2P 为水汽产品^[32], 其中包含了水汽含量信息和云信息。MER_FR__2P 为全分辨率产品, 空间分辨率为 260m × 290m, 而 MER_RR__2P 为降低分辨率产品, 空间分辨率为 1040m × 1160m。

相对来说, MERIS 全分辨率水汽产品比 MODIS 水汽产品更有优势, 更能准确反映 ASAR 数据获取时刻水汽场的分布状态, 为 InSAR 大气改正提供更为精确的延迟数据。现有研究表明, MERIS 水汽产品与 GPS/ 无线电探空水汽产品的吻合度在标准差 1.1mm 左右^[22-23]。利用 MERIS 水汽产品进行大气改正后, InSAR 形变量的中误差由改正前的 11.7mm 降到 6mm^[24]。

3.4 MODIS/ MERIS 集成的 InSAR 大气改正方法

MERIS 全分辨率水汽产品分辨率很高, 但 MERIS 云掩模产品的精度很低, 而 MODIS 云掩模产品的精度比较高, 因此将两者结合可以充分利用各自的优势, 弥补各自的不足。

获取与干涉对成像时间(准)同步的 MODIS、MERIS 水汽产品后, 利用少量 GPS 数据对 MODIS-PWV 进行校准, 然后对 MERIS 与校准后的 MODIS 水汽数据采用 (MERIS + MODIS) (时间 1)

+ (MERIS + MODIS) (时间 2) 组合方式处理。假设两种水汽数据精度相同, 两种数据求平均可以降低噪声, 进一步提高精度。另外, 在对云区进行内插时, 考虑到 MODIS 云掩模产品精度比 MERIS 云掩模产品精度高, 利用 MODIS 云掩模产品标识云区。

3.5 基于 FY 水汽数据的 InSAR 大气改正方法

风云卫星是我国自主研发的气象卫星, FY-3A 于 2008 年 5 月 27 日成功发射^[33], 其搭载的中分辨率光谱成像仪 MERSI 可以获取较高分辨率的水汽数据, 目前, 可以直接从国家卫星气象中心免费下载空间分辨率为 1km × 1km 的 MERSI 可降水汽产品。

利用 FY 水汽数据进行 InSAR 大气改正的研究相对较少, 文献[27] 尝试利用 NOAA-16/ FY-1C 集成的方法对 ASAR 影像中大气影响进行去除, 但需要辅助实地考察, 对地形起伏较大的区域的去除效果也有待进一步验证。考虑到 FY-3A 通过赤道降交点的时间为地方时 10:00-10:20 左右, 与搭载有 MODIS 传感器的 Terra 卫星通过时间很接近, 在今后的研究中考虑 GPS/ FY-3A 集成的 InSAR 大气改正方法, 且随着风云系列卫星的不断发射, 分辨率不断提高, 利用 FY 水汽数据进行 InSAR 大气改正将成为一个重要的研究课题。

GPS、MODIS、MERIS、FY 等水汽数据是目前进行 InSAR 大气改正利用的主要外部数据源。如前文对几种改正方法的介绍, 这几种数据源由于自身的特点, 相应的大气改正方法在具体应用中各有优缺点, 因此需要结合实际情况确定较优方法, 表 1 列出了这几种方法的主要特征参数。

表 1 不同大气改正方法的主要特征参数

	GPS	GPS/ MODIS	MERIS	MODIS/ MERIS	GPS/ FY-3A
观测值	GPS 连续监测网络	至少一个 GPS 测站数据; 准同步 MODIS 水汽数据	同步 MERIS 水汽数据	至少一个 GPS 测站数据; (准) 同步 MODIS、MERIS 水汽数据	至少一个 GPS 测站; 准同步的 FY-3A 水汽数据
降交点地方时	连续	10: 30	10: 00	10: 30/ 10: 00	10: 00- 10: 20
覆盖范围	区域性	全球	全球	全球	全球
适用时间	任何时刻	白天	白天	白天	白天
空间分辨率	几 km 至几百 km	1km × 1km	RR: 1040m × 1160m FR: 260m × 290m	1km × 1km/ 260m × 290m	1km × 1km
时间分辨率	几乎连续	某些纬度区 每天可观测 4 次	3 天	3 天	5.5 天
对云敏感度	无	有	有	有	有
PWV 精度	~ 1mm	1.6mm~ 2mm	1.6mm~ 2mm	1.1mm~ 1.4mm	10% ~ 20%

4 结束语

大气影响是重复轨道 InSAR 测量的重要误差源,它的有效去除对于提高 InSAR 测量的精度至关重要。目前,利用多影像的时间序列 DInSAR 方法和利用 GPS、MODIS、MERIS、FY 等外部数据进行 InSAR 大气改正是当前大气改正的研究重点,但这几方法都存在一定的局限性。时间序列 DInSAR 方法需要的影像数量比较多;基于 GPS 观测的大气改正方法受 GPS 观测网密度和内插精度的限制;基于 GPS/MODIS、MERIS、MODIS/MERIS、GPS/FY-3A 的大气改正方法都受云的影响,对于多云覆盖的地区难以进行比较精确的大气延迟相位改正。

因此,在选择大气改正方法时,要充分考虑影像的数量、大气状况(如云区范围)和可用的外部数据等条件。

随着 TerraSAR-X、COSMO-SkyMed、RADA-RSAT-2 等高分辨率雷达卫星的发射,如何有效去除高分辨率雷达卫星数据中的大气影响是今后进一步研究的方向之一。同时,考虑到 GPS、MODIS、MERIS、FY 等不同外部数据存在一定的互补性,在今后的研究中,可以将多种外部数据进行集成,充分利用每种数据的优势,发展一种多星协同的综合大气改正方法,实现对大气相位的直接建模,不断提高计算出的大气延迟相位的精度,更加有效全面地去除大气影响。

参考文献

- [1] 王超,张红,刘智.星载合成孔径雷达干涉测量[M].北京:科学出版社,2002.
- [2] 龚健雅.对地观测数据处理与分析研究进展[M].武汉:武汉大学出版社,2008.
- [3] Zebker H A, Rosen P A, Hensley S. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps[J]. *Geophys. Res.*, 1997(102): 7547- 7563.
- [4] Shimada M. Correction of the satellite's state vector and the atmospheric excess path delay in SAR interferometry: Application to surface deformation detection[J]. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2000(5): 2236- 2238.
- [5] Shimada M, Minamisawa M, Isoguchi O. Correction of atmospheric excess path delay appeared in repeat-pass SAR interferometry using objective analysis data[J]. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2001(5): 2052- 2054.
- [6] Massonnet D, Feigl K L. Discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferograms[J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(12): 1537- 1540.
- [7] Emdarson T R, Simons M, Webb H F. Neutral atmospheric delay in interferometric synthetic aperture radar applications: Statistical description and mitigation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(B5): 2231.
- [8] Crosetto M, Tscherning C C, Crippa B, et al. Subsidence monitoring using SAR interferometry: Reduction of the atmospheric effects using stochastic filtering[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(9): 26.
- [9] 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, 38(5): 2202- 2212.
- [10] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 820.
- [11] Bock Y, Williams S D P. Integrated satellite interferometry in southern California[J]. *Eos Trans. AGU*, 1997, 78(29): 299- 300.
- [12] Williams, S, Bock, Y, Fang, P. Integrated satellite interferometry: Tropospheric noise, gps estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar products[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B11): 27051- 27068.
- [13] Li Z H, Cross P, Muller J P. Successful application of GPS-Derived water vapor to the improvement of the estimation of surface deformation from InSAR[C]//ION GNSS 2005, 2005.
- [14] Li Z H, Fielding E J, Cross P, et al. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction: GPS topography-dependent turbulence model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(B2): 404.
- [15] Cheng S L, Lin H, Chiu L S, et al. Validation and correction of elevation-correlated atmospheric stratification effect in InSAR ground feature deformation monitoring[C]//SITMD2010, 2010.
- [16] Li Z W, Ding X L, Liu G X. Modeling atmospheric effects on InSAR with meteorological and continuous GPS Observations: Algorithms and Some Test results[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004(66): 907- 917.
- [17] Li Z H, Muller J P, Cross P, et al. Interferometric synthetic aperture radar(InSAR) atmospheric correction: GPS, moderate resolution imaging spectroradiometer(MODIS), and InSAR integration[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(B3): 410.
- [18] Li Z H. Correction of atmospheric water vapour effects on repeat-pass SAR interferometry using GPS, MODIS and MER-

- IS data[D]. London: University College London, 2005.
- [19] 刘圣伟, 张朝林, 郭小芳, 等. MODIS 水汽反演用于 InSAR 大气校正的理论研究[J]. 遥感学报, 2007(3): 367- 372.
- [20] 宋小刚. 基于 GPS 和 MODIS 的 ASAR 数据干涉测量中大气改正方法研究[D]. 武汉: 武汉大学遥感信息工程学院, 2008.
- [21] 宋小刚, 李德仁, 单新建, 等. 基于 GPS 和 MODIS 的 ENVISAT ASAR 数据干涉测量中大气改正方法研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(6): 1457- 1464.
- [22] Li Z H, Fielding E J, Cross P, et al. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction: Medium resolution imaging spectrometer and advanced synthetic aperture radar integration[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(6): 816.
- [23] Li Z H, Muller J P, Cross P, et al. Assessment of the potential of MERIS near-infrared water vapour products to correct ASAR interferometric measurements[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(1/2): 349- 365.
- [24] Li Z H, Fielding E J, Cross P, et al. Advanced InSAR atmospheric correction: MERIS/MODIS combination and stacked water vapour models[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009(30): 3343- 3363.
- [25] Zeng Q M, Li Y, Li X F. Correction of tropospheric water vapour effect on ASAR interferogram using synchronous MERIS data[C]// IEEE, 2007: 2086- 2089.
- [26] 李小凡, 李颖, 曾琪明, 等. 应用与 ASAR 同步的 MERIS 对重复轨道 InSAR 进行大气校正[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009, 45(6): 1012- 1018.
- [27] 谯华, 单新建, 张云华, 等. 利用 NOAA_16/FY_1C 和 ASAR 数据纠正大气水汽对重轨星载 D-InSAR 的影响[J]. 地球物理学报, 2007, 50(3): 707- 713.
- [28] 张弓, 许健民, 黄意玢. 用 FY-1C 两个近红外太阳反射光通道的观测数据反演水汽总含量[J]. 应用气象学报, 2003, 14(4): 385- 394.
- [29] Xiaoli Ding, Zhiwei Li, et al. Atmospheric effects on InSAR measurements and their mitigation[J]. Sensors, 2008(8): 5426- 5448.
- [30] 鄢子平, 李振洪. InSAR 大气水汽改正模型比较应用研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(7): 723- 727.
- [31] 刘忠, 凌峰, 张秋文. MODIS 遥感数据产品处理流程与大气数据获取[J]. 遥感信息, 2005(78): 52- 57.
- [32] MERIS Manual[EB/OL]. http://envisat.esa.int/instruments/meris/pdf/atbd_2_04.pdf.
- [33] 杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 中国新一代极轨气象卫星——风云三号[J]. 气象学报, 2009, 67(4): 501- 509.

“三江源区生态环境遥感动态监测地理信息系统”和 “柴达木循环经济试验区地理信息系统”项目通过验收并启动

2011年7月6日,“三江源区生态环境遥感动态监测地理信息系统”与“柴达木循环经济试验区地理信息系统”在青海省西宁市通过由国家测绘地理信息局与青海省人民政府组织的联合验收,国家测绘地理信息局副局长、国家西部测图工程实施领导小组组长李维森以及青海省人民政府副秘书长姚海瑜出席会议。

“三江源生态环境遥感动态监测地理信息系统”和“柴达木循环经济试验区地理信息系统”是国家测绘地理信息局和青海省人民政府依据2006年签订的《开展青海省地理空间信息开发利用合作协议》合作开展的项目,是“国家西部1:5万地形图空白区测图工程”建设内容的重要组成部分,由青海省测绘局承担,中国测绘科学研究院负责技术支持。历经四年的艰苦努力,充分利用西部测图和省级基础测绘成果,整合工作区多源、多类型的基础空间数据、自然资源与国民经济数据、循环经济数据、生态环境数据,建立了服务于政府和相关部门循环经济管理规划、生态环境监测的专题应用地理信息系统。

针对三江源区生态环境保护的需要,建立了覆盖三江源全域的基础地理信息数据库,形成了一张图;整合多部门专题数据,对三江源区进行了生态环境本底高分辨率遥感调查和重点区域的遥感动态监测,形成三江源生态环境高分辨率遥感动态监测技术流程,建成了生态环境专题数据库;实现了生态环境监测成果的发布、快速查询与综合分析,建成了生态环境监测的“多源数据获取、处理、成果发布一体化、实时化”的综合性服务系统。项目成果已在青海省政府、发改委、农牧厅、应急办、三江源办及青海省工程咨询中心等单位得到应用,在三江源生态环境监测及兴海县鼠疫及玉树地震应急突发事件中发挥了重要作用。针对柴达木循环经济试验区科学管理的需要,建立了覆盖柴达木地区的多尺度基础地理信息数据库,以及柴达木区域的中分辨率影像数据库和城市高分辨率影像数据库;构建了柴达木地区循环产业数据库、工业园区和重点企业数据库、资源数据库、基础设施数据库、社会经济数据库和生态环境数据库;研究建立了面向循环经济决策的企业选址、水资源配置等空间分析模型,自主研发了循环经济地理信息服务软件,构建了包括“循环经济产业体系、工业园区与重点企业、资源信息、基础设施、社会经济、生态环境”六个应用专题的在线信息服务系统。项目成果已经在青海省政府、青海省发展和改革委员会、海西州政府、海西州发展和改革委员会等部门正式安装服务,为柴达木循环经济试验区科学管理、循环经济规划、抗洪救灾等提供了直接的空间信息服务。

作为西部测图工程的重要组成部分,这两个系统的建成标志着青海省转变地理信息服务方式取得了新进展,为青海省生态保护及循环经济建设提供了客观、翔实、丰富的地理信息服务以及直观、科学、准确的空间辅助决策支持。