

许文斌,李志伟,丁晓利等.利用 MERIS 水汽数据改正 ASAR 干涉图中的大气影响.地球物理学报,2010,53(5):1073~1084,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.007

Xu W B, Li Z W, Ding X L, et al. Correcting atmospheric effects in ASAR interferogram with MERIS integrated water vapor data. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2010, 53(5):1073~1084, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.007

利用 MERIS 水汽数据改正 ASAR 干涉图中的大气影响

许文斌^{1,2}, 李志伟^{1,2*}, 丁晓利^{1,3}, 冯光财³, 胡俊^{1,2},
龙江平^{1,2}, 尹宏杰^{1,2}, 杨亚夫^{1,2}

1 中南大学 信息物理工程学院, 长沙 410083

2 湖南省普通高校精密工程测量及形变灾害监测重点实验室

3 香港理工大学 土地测量与地理资讯学系, 香港九龙

摘要 大气对流层对雷达信号的传播延迟是制约重复轨道 InSAR 高精度测量应用的重要因素之一.本文描述了 MERIS 水汽数据用于 ASAR 干涉图大气改正的方法;并以美国南加州地区为例,选取 4 对 ENVISAT ASAR 数据进行了大气改正的研究.结果显示对这 4 幅干涉图,经过 MERIS 水汽数据改正后 InSAR 与 GPS 差异的 RMS 分别降低了 41.7%, 65.2%, 19.3% 和 39.4%.平均改善程度达 41.4%.更重要的是,经过 MERIS 水汽改正后,从 2005~2007 年干涉图和 2004~2007 年干涉图中,能清楚地识别出三处形变最明显的区域:Long Beach-Santa Ana 盆地、Pomona-Ontario 和 San Bernardino, 其形变速率从 -8 mm/a 到 -28 mm/a, 大部分在 -20 mm/a 左右, 与这些地区 2003 年以前的历史形变速率基本一致.因此,采用无云条件下的 MERIS 水蒸汽数据改正同步获取的 ASAR 干涉图,可以显著地降低大气水汽对干涉图相位的影响,从而更真实地反映地表形变等地球物理信号.

关键词 合成孔径雷达干涉, MERIS, ASAR, GPS, 大气改正, 地表形变

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.007

中图分类号 P407

收稿日期 2009-09-07, 2010-01-21 收修定稿

Correcting atmospheric effects in ASAR interferogram with MERIS integrated water vapor data

XU Wen-Bin^{1,2}, LI Zhi-Wei^{1,2*}, DING Xiao-Li^{1,3}, FENG Guang-Cai³, HU Jun^{1,2},
LONG Jiang-Ping^{1,2}, YIN Hong-Jie^{1,2}, YANG Ya-Fu^{1,2}

1 School of Info-Physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

2 Key Lab. of Precise Engineering Surveying & Deformation Hazard Monitoring of Hunan Province, China

3 Dept. of Land Surveying & Geo-Informatics, the Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China

Abstract The troposphere delay of radar signals has been one of the major limitations for the application of high precision repeat pass InSAR. In this paper, we present the atmospheric correction methods for ASAR interferograms with MERIS integrated water vapor (IWV) data.

基金项目 国家自然科学基金(40774003, 40974006), 香港研究资助局项目(PolyU5161/06E), 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0570), 国家西部 1:50000 空白区测图工程 2009 年度研究课题, 湖南省科技厅重大专项(2008FJ1006), 中南大学研究生教育创新工程项目(2009ssxt179)资助.

作者简介 许文斌,男,1985 年生,硕士研究生,研究方向为 InSAR 大气改正和 InSAR 监测地表变形. E-mail:xuwenbin-23@163.com

* 通讯作者 李志伟,男,1974 年生,教授,主要从事 InSAR 研究. E-mail:zwli@mail.csu.edu.cn

Then, using four ASAR interferometric pairs over Southern California as examples, this paper conducts the atmospheric corrections with MERIS IWV data. The results show that after the correction the RMS differences between InSAR and GPS were reduced by 41.7%, 65.2%, 19.3%, and 39.4%, respectively for the four selected interferograms, with an average improvement of 41.4%. Most importantly, after the correction, three distinct deformation areas have been identified, i. e., Long Beach-Santa Ana Basin, Pomona-Ontario and San Bernardino, with the deformation velocities ranging from -8 mm/a to -28 mm/a and on average around -20 mm/a. The deformation is quite consistent with the historical deformation derived by other researchers. Thus, using the cloudless MERIS IWV data for correcting the synchronized ASAR interferogram can significantly reduce the atmospheric effects in the interferograms and further better capture the ground deformation and other geophysical signals.

Keywords InSAR, MERIS, ASAR, GPS, Atmospheric correction, Ground deformation

1 引言

在过去的 20 年里,星载合成孔径雷达干涉测量(InSAR)作为一种新型遥感技术,以其能够高精度获取地球表面地形和监测地表形变而备受人们的关注^[1~8].然而当雷达信号穿过大气层时,大气水汽的时空变化容易引起雷达信号的传播延迟和传播路径弯曲^[9],大大影响了高精度合成孔径雷达干涉测量的应用.1994 年,Massonnet 等^[10]在研究 1992 年 Landers 地震时首先识别出重复轨道 InSAR 测量中的大气影响.1997 年,Zebker 等^[11]指出当大气相对湿度时空变化 20% 时,将引起 10~14 cm 的形变测量误差,或者 80~290 m 的高程测量误差(垂直基线 400 至 100 m).许多学者已经提出了降低干涉图大气效应的方法,主要包括以下几类:干涉图平均法(Stacking)^[11, 12];基于外部数据的大气改正方法,根据外部数据的不同,可大致分为地面气象数据^[12, 13],高分辨率的气象模型^[14, 15],GPS 数据^[12, 16~19],GPS+地面气象数据/传输模型^[20~23],GPS+MODIS 数据^[22, 24, 25],气象卫星数据^[26]等;干涉图之间的相关分析法^[27~29];干涉对比较(Pair-wise logic)法^[30]以及永久散射体(Permanent Scatterers)技术^[31, 32].2007 年,Li 等^[33]采用上海地区的 4 幅干涉图,分析了大气噪声的高斯性态、各向异性和能量谱特征,并从理论上论证了要校正 InSAR 干涉图中 90% 的大气能量,外部数据的空间分辨率至少要达到 0.3 km.2008 年,Ding 等^[34]综述了上述大气改正方法并评价了它们应用于重复轨道 InSAR 大气改正的优缺点.

在基于外部数据的校正中,除了上述资料外,还

有一种新型资料——中等分辨率成像光谱仪(MERIS)资料.MERIS 与先进合成孔径雷达(ASAR)传感器同时搭载在欧洲空间局 Envisat 卫星上.尽管 MERIS 的主要任务是测量海洋以及沿海地区的海洋颜色,它仍包含两个近红外的水蒸汽通道,可以反演全球陆地、云层以及水面上的大气水汽总量.由于 MERIS 水汽数据与 ASAR 数据可以同时获取,能够同步记录 ASAR 成像时刻的水汽情况,因此用 MERIS 改正 ASAR 干涉图大气影响具有更好的时效性.此外,相比 GPS 网或卫星气象数据,MERIS 水汽数据具有更高的空间分辨率,例如 MERIS 全分辨率为 260 m×290 m,低分辨率 1040 m×1200 m (<http://envisat.esa.int/handbooks>).因此,利用 MERIS 数据校正 ASAR 干涉图大气影响具有很大的潜力.在国外,利用 MERIS 校正 ASAR 干涉图中的大气影响已经作了一些有益的探索^[35~37].但在国内,从公开发表的文献来看,鲜有这方面的报道.究其原因,正如文献[25]所言,可能与 MERIS 水汽数据不免费对外开放有关.

通过申请欧洲空间局 Category-1/AO 项目,本研究获得了一批同步的 MERIS 水汽数据和 ASAR 数据,为开展 MERIS 资料改正 ASAR 干涉图大气影响的实验提供了数据准备.本文将以美国南加州洛杉矶地区为研究对象,开展 MERIS 大气改正试验,并采用南加州综合 GPS 网(SCIGN, <http://www.scign.org>)提供的 GPS 数据对实验结果进行验证.本文的主要目的是提供一些实例研究,藉此以评估利用 MERIS 水汽数据改正 InSAR 干涉图中大气效应的精度和可靠性,以及考察经过大气改正后的干涉图能否真实地反映地表形变等地球物理信号.南加州洛杉矶地区经历着复杂的构造运动和人

为活动引起的地表变形,已有的采用 InSAR 技术的监测工作大部分集中在研究 2003 年以前的形变(使用 ERS-1/2 数据)^[38~41].本文将采用 2004 年以后的 ASAR 数据,本文的工作也将有助于我们了解 2004 年以后该地区的地表变形情况.

2 数据处理方法

2.1 MERIS 近红外水汽数据生成 InSAR 大气延迟相位改正图

MERIS 传感器在可见光和近红外光谱范围内设置了 15 个光谱波段,其中第 14 光谱通道(中心波长 885 nm)为大气窗口,第 15 光谱通道(中心波长 900 nm)位于水汽吸收波段,通过这两个光谱通道的观测资料和差分吸收技术可以估计大气水汽含量(<http://envisat.esa.int/handbooks>).2001 年,Bennartz 等^[42]就提出 MERIS 能以较高精度估计大气可降水汽量,在陆地上的理论精度大约为 1.7 kg/m².2006 年,Li 等^[35]论证了 MERIS 近红外水汽数据改正 ASAR 干涉测量的可行性,并从时空上对比了 MERIS 与 GPS 和 Radiosonde 水汽值,得到它们之间的标准偏差仅为 1.1 mm.

本文采用 MER_RR_2P 数据,该数据不仅提供了云层信息,可以用于对数据中存在的云层进行掩膜;还提供了以 g/cm² 为单位的大气水汽含量 IWV (Integrated Water Vapor).通过公式(1)可将 IWV 转化为天顶湿延迟 ZWD (Zenith Wet Delay):

$$ZWD = \Pi \frac{IWV}{\rho}, \quad (1)$$

式中:

$$\Pi = \frac{\rho R_v \left(\frac{k_3}{T_m} + k_2 - w k_1 \right)}{10^6}, \quad (2)$$

其中 ρ 为水的密度, R_v 为水汽气体常数, k_1 、 k_2 、 k_3 为大气折射常量, T_m 为加权平均温度, $w = 0.0622$. Π 的计算涉及到大气加权平均气温 T_m 的计算,比较复杂^[43].由于 Π 的值一般在 6.0~6.5 之间,同时参考其他一些研究工作^[22,25],本实验取 $\Pi = 6.2$.

由于 MERIS 的空间分辨率比 ASAR 要低得多,而且由于云层的影响 MERIS 格网资料会有一些“空洞”,要利用 MERIS 水汽资料改正 ASAR 干涉图,首先必须用插值的方法把 MERIS 天顶水汽延迟 ZWD 采样到 ASAR 干涉图空间.本文采用 Kriging 插值方法进行插值^[16,21],获得 ASAR 干涉

图空间的天顶水汽延迟图 ZWDM (Zenith Wet Delay Map).对于重复轨道干涉测量,可以分别获得对应于主、从 SAR 影像成像时刻的天顶水汽延迟图,记为 ZWDM₁ 和 ZWDM₂.把主、从影像的天顶水汽延迟图作差,并映射到雷达视线方向(LOS),然后转换成相位,就得到 InSAR 大气延迟相位改正图:

$$\Delta\phi_{ifm_atm} = \Delta\phi_{atm1} - \Delta\phi_{atm2} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{1}{\cos\theta_{inc}} \times (ZWDM_1 - ZWDM_2), \quad (3)$$

其中, $\lambda = 56.3$ mm 为 ASAR 波长; θ_{inc} 为雷达信号入射角,本实验取 $\theta_{inc} = 23^\circ$.

2.2 ASAR 数据干涉处理及干涉图大气改正

实验选取了 4 对南加州地区 ENVISAT ASAR 影像,每景影像覆盖范围为 10000 km²,SAR 数据的具体参数见表 1. 利用 GAMMA 软件进行干涉处理生成干涉图,在干涉处理过程中,采用欧洲空间局的精确 DORIS 轨道(从 ESA ESRIN ftp site 下载),以提高影像配准精度、平地效应去除精度以及地形、轨道等残余系统性相位的拟合和去除精度.为了抑制相位噪声,在生成干涉图的时候,距离向和方位向分别做 4 视和 20 视的多视处理,并采用改进的 Goldstein 滤波法^[44]对生成的干涉图进行滤波,以提高干涉图的质量. 地形相位的去除采用 1 弧秒的 SRTM DEM(空间分辨率约为 30×30 m),SRTM 的精度大约为 7 m^[18,45],引起的相位误差在干涉图 2~4 中低于或略高于 InSAR 的典型相位噪声 0.75 rad^[46],而在干涉图 1 中要高于 InSAR 的典型相位噪声,但从下一节的干涉处理结果来看,该干涉图大气噪声(2.97 rad)仍占主导地位,因此在本文中我们忽略地形相位的影响. 最后利用最小费用流法(MCF)对差分干涉图进行相位解缠. 解缠后的相位图 $\Delta\phi_{ifm}$ 包含地表真实形变的相位 $\Delta\phi_{ifm_def}$ 和由大气水汽延迟相位 $\Delta\phi_{ifm_atm}$,即

$$\Delta\phi_{ifm} = \Delta\phi_{ifm_def} + \Delta\phi_{ifm_atm}. \quad (4)$$

干涉图的大气改正就是将上一步计算得到的大气延迟相位改正图 $\Delta\phi_{ifm_atm}$ 从干涉相位图 $\Delta\phi_{ifm}$ 中扣除. 改正后的干涉图中剩下的就是主、从影像成像期间的地表形变相位 $\Delta\phi_{ifm_def}$,如果主、从影像成像期间地表没有形变,例如间隔时间非常短(如 1 天)或地表非常稳定,改正后的干涉图相位应该接近于零.

2.3 InSAR 大气改正效果验证

本实验所研究的南加州地区是构造活动频繁以及人工地下水抽取与回灌引起地表季节性形变的典型区域^[38,39]. InSAR 大气改正效果的验证通过:

表 1 SAR 影像基本参数
Table 1 Basic parameters of SAR images

	主影像时间	辅影像时间	垂直基线/m	σ/rad	时间间隔/d
干涉图 1	2007 年 10 月 6 日	2007 年 11 月 10 日	338~358	1.61	35
干涉图 2	2004 年 8 月 7 日	2005 年 10 月 1 日	-189~-169	0.83	420
干涉图 3	2005 年 10 月 1 日	2007 年 10 月 6 日	72 ~ 76	0.34	735
干涉图 4	2004 年 8 月 7 日	2007 年 10 月 6 日	-114 ~ -97	0.49	1155

注: σ 代表由于 SRTM DEM 的地形偏差可能引起的相位误差^[45].

(1) 定量比较大气改正前后干涉图反映的地表形变与 GPS 精密定位获得的形变的差异; (2) 定性分析大气改正前后干涉图反映的地表形变与地质构造(如断层、盆地等)和人为活动(如地下水、石油抽取等)的联系. 在 InSAR 与 GPS 定量比较时, 由于 InSAR 只能测得一维形变量(即视线方向的形变), 我们必须先把 GPS 测得的三维形变投影到雷达视线(LOS)方向. 投影公式为^[47]

$$\Delta \mathbf{L} = [\sin \theta_{\text{inc}} \sin \alpha \quad -\sin \theta_{\text{inc}} \cos \alpha \quad \cos \theta_{\text{inc}}] \begin{bmatrix} \delta_N \\ \delta_E \\ \delta_U \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 $\Delta \mathbf{L}$ 是雷达两次成像间地表在雷达视线方向的形变量; α 代表卫星航向的方位角(从北方向开始, 顺时针方向为正); $\delta_N, \delta_E, \delta_U$ 分别为 GPS 站点在北方向、东方向和垂直方向的形变量, 通过下载两次成像时刻 SCIGN 网的 GPS 精密定位结果并进行差分得到. GPS 测得的形变代表一个点的形变, 而 InSAR 测得的形变代表一个分辨单元内的平均形变, 如果地表形变不剧烈, 可以近似认为两者代表相同地表形变. 因此, 在结果验证时, 直接把 GPS 测得的形

变和与它最近的 InSAR 分辨单元的形变进行比较. 但是, 由于 SCIGN 网是逐步建立的, 干涉图的成像时间又相差几年, 而且实验所采用的 GPS 测站并不是每天都记录了观测数据, 所以这 4 幅干涉图对应的时间范围内可用来与 InSAR 结果对比的 GPS 站点数是不同的.

3 实例研究与结果分析

3.1 大气改正结果

3.1.1 干涉图 1: 2007 年 10 月 6 日至 2007 年 11 月 10 日

本幅干涉图的时间间隔比较短, 可以认为它的形变量不大. 图 1a 是叠加在 SRTM DEM 上的原始干涉图, 图 1b 是相应的 MERIS 差分水汽延迟图, 图 1c 是改正后的干涉图. 从图 1 中可以看到, MERIS 水汽模拟了该区域的大气信号, 经过改正后的 InSAR 形变结果基本都在 0 mm 附近, 干涉图的相位变化从改正前的 2.97 rad 降低到改正后的 2.05 rad. 图 2 显示了大气改正前后 InSAR 与 GPS 监测结果的比较, 从中可以发现经过大气改正

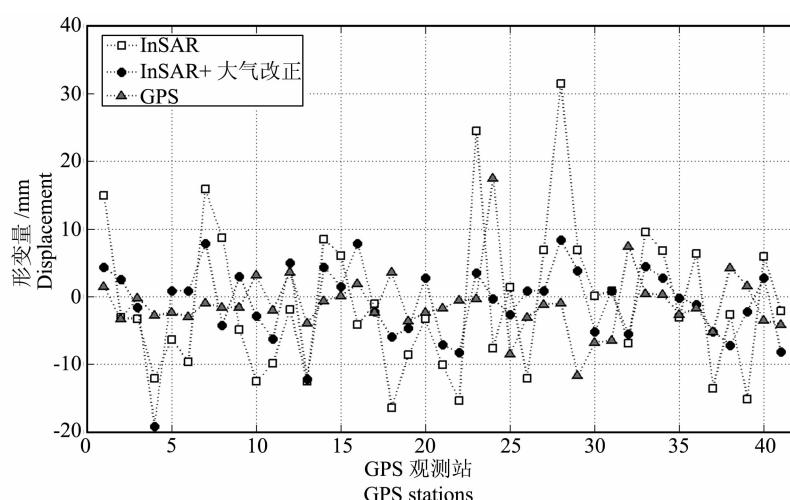


图 2 大气改正前后 InSAR 和 GPS 在雷达视线方向上的形变结果对比(干涉对 20071006_20071110)

Fig. 2 Comparison of LOS range change differences between InSAR and GPS before and after atmospheric correction (interferometric pair 20071006_20071110)

后 InSAR 测得的大多数形变值更接近 GPS 探测的形变结果, InSAR 与 GPS 差异的 RMS 从改正前的 1.20 cm 降低到改正后的 0.70 cm, 改善程度达 41.7%.

3.1.2 干涉图 2:2004 年 8 月 7 日至 2005 年 10 月 1 日

本幅干涉图的时间间隔为 420 天, 图 3a 是叠加在 SRTM DEM 上的原始干涉图, 图 3b 是相应的 MERIS 差分水汽延迟图, 图 3c 是改正后的干涉图。干涉图的相位变化从改正前的 4.86 rad 降低到改正后的 1.83 rad, 因此经过大气改正后的干涉图相

位变得更加平缓。图 4 显示了大气改正前后 InSAR 与 GPS 监测结果的比较, 从中可以看出由于大气水汽的时空变化, 使原始干涉图大大高估了这段时间内的地表形变, 经过大气改正后 InSAR 监测的形变值十分趋近 GPS 记录的形变结果, 说明经过 MERIS 水汽数据改正后的结果更接近真实的形变。数值结果显示 InSAR 与 GPS 差异的 RMS 从改正前的 2.30 cm 降低到改正后的 0.80 cm, 改善程度达 65.2%.

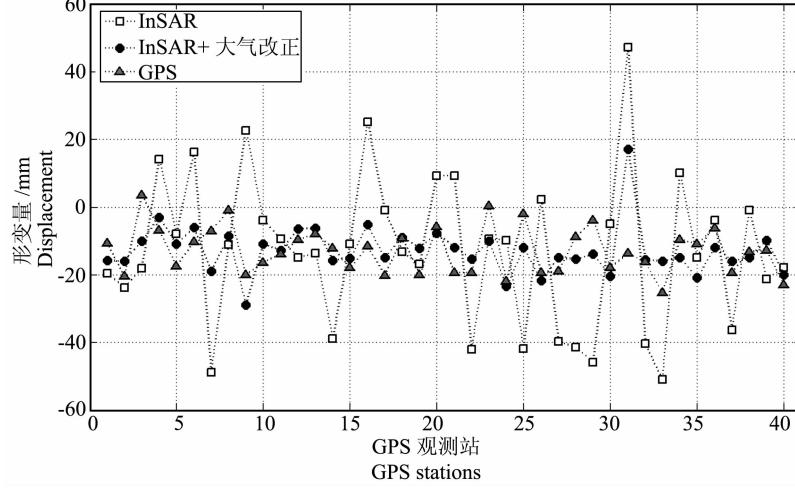


图 4 大气改正前后 InSAR 和 GPS 在雷达视线方向上的形变结果对比(干涉对 20040807_20051001)

Fig. 4 Comparison of LOS range change differences between InSAR and GPS before and after atmospheric correction (interferometric pair 20040807_20051001)

3.1.3 干涉图 3:2005 年 10 月 1 日至 2007 年 10 月 6 日

本幅干涉图的时间间隔约为 2 年, 图 5a 是叠加在 SRTM DEM 上的原始干涉图, 图 5b 是相应的 MERIS 差分水汽延迟图, 图 5c 是改正后的干涉图。通过 GPS 观测数据可知, 该区域地表形变非常明显而且向远离卫星方向运动(即形变为负值), 然而在原始干涉图中可以清楚地看到有两处形变量为正值, 用黑色矩形框进行了标示, 经过改正后的干涉图在这两个区域内的大气效应得到了较大的消减。通过 MEIRS 水汽数据改正后的干涉图相位变化从改正前的 3.04 rad 降低到改正后的 2.69 rad。图 6 显示了大气改正前后 InSAR 与 GPS 监测结果的比较, 从中可以发现改正后 InSAR 监测的形变值与 GPS 记录的形变结果比较吻合, InSAR 与 GPS 差异的 RMS 从改正前的 1.09 cm 降低到改正后的 0.88 cm, 改善程度达 19.3%。

3.1.4 干涉图 4:2004 年 8 月 7 日至 2007 年 10 月 6 日

这是一幅时间跨度 3 年的干涉图, 期间地表发生了显著的形变。图 7a 是叠加在 SRTM DEM 上的

原始干涉图, 图 7b 是相应的 MERIS 差分水汽延迟图, 图 7c 是改正后的干涉图。通过比较图 7a 和 7c 可知, MERIS 水汽较好地模拟了干涉图中的大气影响, 经过大气改正后, 我们可以清楚地辨别出地表形变信息。尽管如此, 有些局部地区的改正效果不好, 如图 8 中 20 号点 LBC1 站点无论在大气改正前还是改正后都未能完全反映该处的形变, 可能与该处除了长期的形变外还存在周期的形变有关, 这种形变对干涉处理的结果带来了较大误差^[39]。但是该方法在一定程度上还是提高了 InSAR 测量的精度, 对比干涉图的相位变化可知, 干涉图相位从改正前的 3.78 rad 降低到应用 MERIS 水汽数据改正后的 2.7 rad。InSAR 和 GPS 在雷达视线方向上距离变化差异的 RMS 也从改正前的 2.16 cm 降低到改正后的 1.31 cm, 改善程度达 39.4%。

3.2 分析与讨论

3.1 节我们给出了南加州地区 4 对干涉图的大气改正结果。本节我们将对上述大气改正的效果以及大气改正后干涉图反映的地表形变信息进行分析

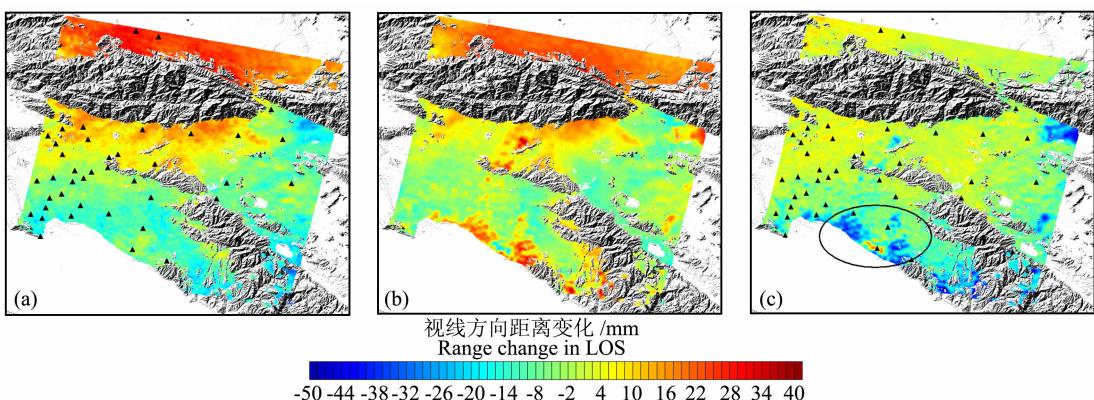


图1 (a) 原始干涉图:20071006_20071110;(b) MERIS 差分水汽延迟图;(c)改正后的干涉图

图中蓝色(负值)代表地表向远离卫星方向运动,红色(正值)代表地表向靠近卫星方向运动(下同). 黑色三角形代表 GPS 站位置.

Fig. 1 (a) Original interferogram: 20071006_20071110; (b) Differenced wet delay map derived from MERIS; (c) Corrected interferogram

Note that blue (negative) implies the ground surface moves away from the satellite and red (positive) implies towards the satellite (ibid). Black triangles denote the location of SCIGN GPS stations.

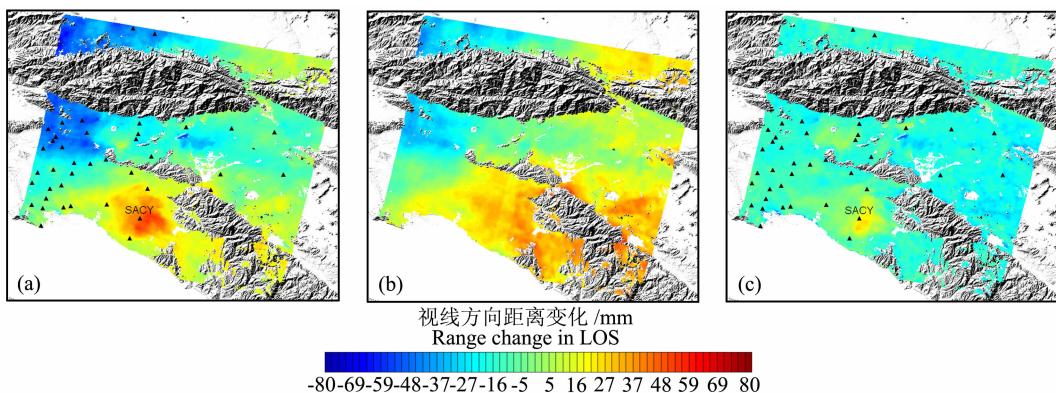


图3 (a) 原始干涉图:20040807_20051001;(b) MERIS 差分水汽延迟图;(c)改正后的干涉图

Fig. 3 (a) Original interferogram: 20040807_20051001; (b) Differenced wet delay map derived from MERIS; (c) Corrected interferogram

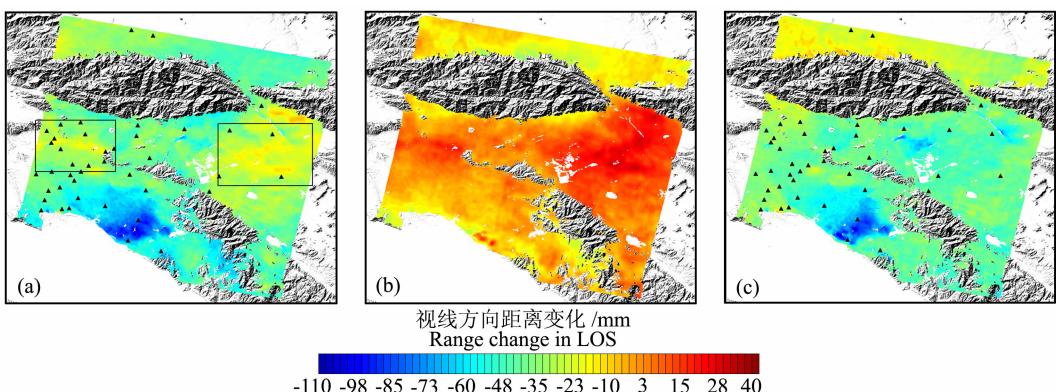


图5 (a) 原始干涉图:20051001_20071006;(b) MERIS 差分水汽延迟图;(c)改正后的干涉图

Fig. 5 (a) Original interferogram: 20051001_20071006; (b) Differenced wet delay map derived from MERIS; (c) Corrected interferogram

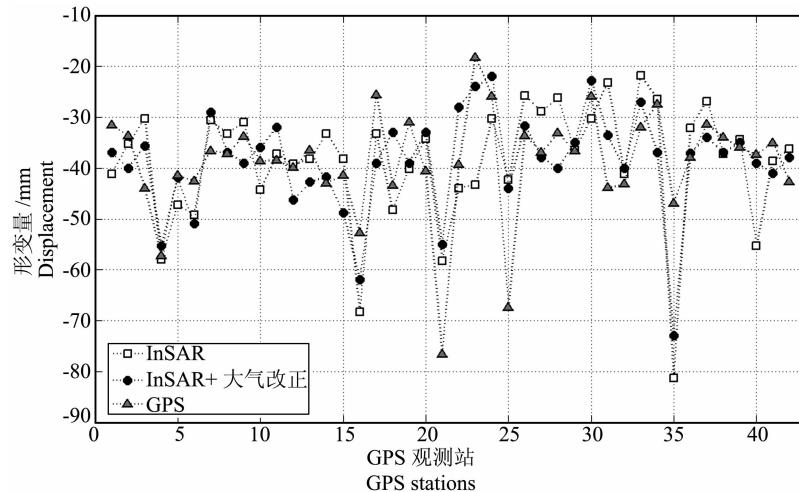


图 6 大气改正前后 InSAR 和 GPS 在雷达视线方向上的形变结果对比(干涉对 20051001_20071006)

Fig. 6 Comparison of LOS range change differences between InSAR and GPS before and after atmospheric correction (Interferometric pair 20051001_20071006)

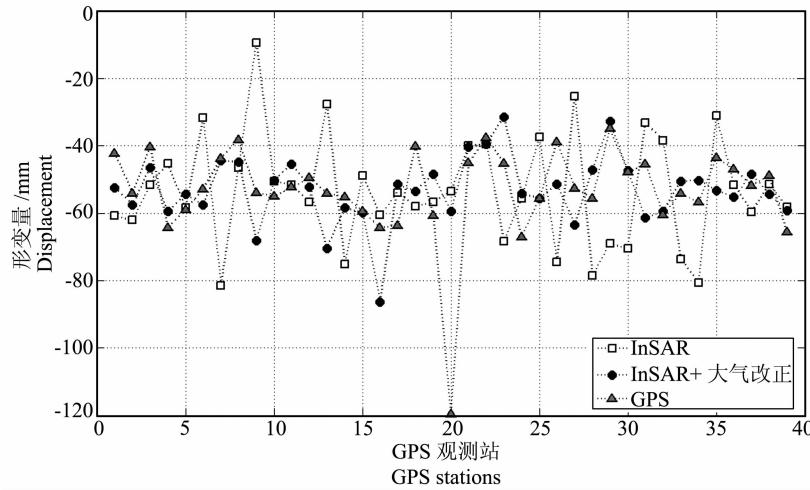


图 8 大气改正前后 InSAR 和 GPS 在雷达视线方向上的形变结果对比(干涉对 20040807_20071006)

Fig. 8 Comparison of LOS range change differences between InSAR and GPS before and after atmospheric correction (interferometric pair 20040807_20071006)

和讨论。

(1)时间间隔 35 天的干涉图 1 所包含的地表形变信息较少,见图 2. 我们主要分析引起部分区域大气改正效果不佳的原因,即图 1c 中黑色椭圆所示的区域。造成这种改正效果不佳的原因主要在两个方面:首先,这是沿海地区,MERIS 在海陆交界处记录的水汽数据往往是不准确的;其次,我们通过分析 2007 年 10 月 6 日和 2007 年 11 月 10 日的 MERIS 水汽数据发现,这个区域可能存在薄云,ESA 提供的 MERIS 云掩膜对薄云的识别能力不强,而且当有云存在时,MEIRS 反演的水汽是云顶层以上的,导致 MERIS 记录的水汽值低于真实值,所以使最终生成的 MERIS 差分水汽延迟值偏大,见图 1b,进

而影响大气改正的精度。

(2)在原始干涉图 2 中,我们可以看到在时间间隔 420 天中 Santa Ana 盆地的形变量为正值(即地表向靠近卫星的方向运动),通过大气改正后,不难发现大部分正的形变值都得到了改正,然而还有一小部分条带形状的正形变值保留下来了(图 3c). 这与 GPS 的结果不符,因为 GPS 显示该区域形变为负(即地表向远离卫星的方向运动,图 4). 进一步的分析,我们发现 2005 年 10 月 1 日的 MERIS 水汽数据存在一个条带形状的水汽分界线(图 9),与图 3b 中条带的形状和位置非常相似. 正是由于该条带的存在限制了大气改正的精度,使图 3c 中 Santa Ana 盆地仍有一小块条带形状的、错误的正形变残留,

而处在条带中间的 SACY 站(图 4 中的 31 号点)有最大的误差,约 60 mm. Delwart 等^[48]称这种水汽条带为“smile effect”,即在 MERIS 成像时,呈扇形分布的相机镜头交界处发生跳变造成的影响. Li 等^[49]用 2005 年 8 月 27 日的 MERIS 数据进行大气改正时也发现了类似的条带现象.除了上述错误的正形变残留外,从图 4 可以看出,经过大气改正后,原始干涉图中数值较大的正形变和负形变都被很好地改正掉了,与 GPS 结果非常一致,大部分形变量都在 $-20 \sim 0$ mm 之间,这与 Watson 等^[39]提出的 Santa Ana 地区时间跨度为春秋两季的地表形变最明显(可达 56 mm),而一年形变量反而小的结论一致.

(3)通过研究时间间隔较长的干涉图 3 和干涉图 4,我们发现了 3 个区域的形变比较明显:Long Beach-Santa Ana 盆地(图 7a 黑色矩形)、Pomona-Ontario 区域(图 7a 黑色椭圆)和 San Bernardino 区

域(图 7a 黑色正方形).这 3 个地区的地表形变与地下水的开采及地下水水位变化有关^[38~41],在这两幅干涉图中地表均处于沉降状态. Bawden 等^[38]指出 Newport-Inglewood 断层地带(NIFZ)是地表形变的分界线,沿 NIFZ 的 Long Beach-Santa Ana 盆地是地表形变明显的区域,长期的沉降量为 12 mm/a 并伴随着垂直方向 55 mm 和水平方向 7 mm 的季节性形变,形变的最大区域在 Santa Ana 城区和该盆地的西北部. 大气改正前后的干涉图(图 5a 和 5c)都较好地反映了该地球物理现象. 通过观察 NIFZ 两旁 GPS 站点 LBC1 和 LBC2 的形变,我们可以发现一个有趣的现象,LBC1 的形变量远大于 LBC2. NIFZ 东侧区域季节性的形变与地下水的抽取有关,LBC1 站点位于 NIFZ 的东侧,从图 5 中我们可以解释为这期间地下水水位明显降低引起了该区域较大的沉降;而由于 NIFZ 对地下水的阻挡,使得位

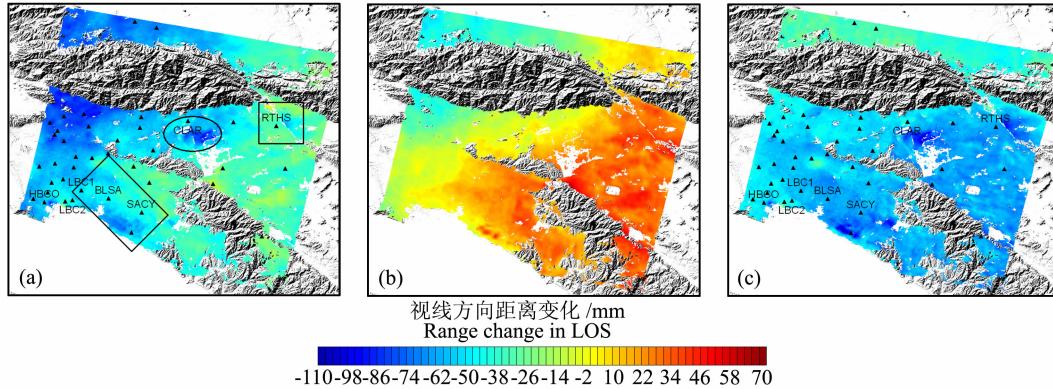


图 7 (a) 原始干涉图: 20040807_20071006; (b) MERIS 差分水汽延迟图; (c) 改正后的干涉图

Fig. 7 (a) Original interferogram: 20040807_20071006; (b) Differenced wet delay map derived from MERIS; (c) Corrected interferogram

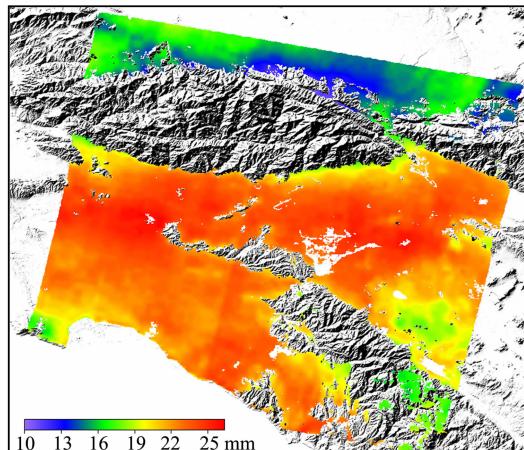


图 9 2005 年 10 月 1 日的 MERIS 可降水汽含量

Fig. 9 MERIS Precipitable Water Vapor (PWV) collected on 1 October 2005

于该断裂带西侧的 LBC2 站点的地表形变量较小,但是在 Wilmington 区域地表形变又变得明显,这与该区域大量开采石油有关^[38]. 对于 Pomona-Ontario 区域,与其他大量的研究^[24,36,38~41,49]一样,本文也监测到了显著的沉降. 由于监测结果显示该区域一直处于沉降状态,这种长期的沉降应该是由于地下水的大量抽取已经造成了该地区地下含水层永久的非弹性压缩,它所带来的沉降变形不会因为地面水的大量回灌而使地表抬升到原来的位置. Lu 等^[50]着重研究了 San Bernardino 区域 1992~1993 年的地表形变,其中一幅时间间隔仅 8 个月的干涉图反映的地表形变令人感到惊讶:由于 San Bernardino 山脉和 San Gabriel 山脉异常的高山径流使该处地下水水位显著增加,从而引起了地表大约 7 cm 的抬

升。进入 21 世纪以来,许多研究结果^[24,36,40,49]显示该区域的地表形变主要表现为沉降的趋势。本文图 5a 由于大气水汽的影响掩盖了地表真实的形变特征,而从经过大气改正后的干涉图 5c 中,我们可以清楚地识别出该处 2004~2007 年的地表形变仍然以沉降为主。另一幅经过大气改正后的干涉图 7c 则扩展图 7a 所反映的沉降区域范围。图 10 显示了经过大气改正后 InSAR 测得的 5 个 GPS 站点附近的形变量。假设 2004 年 8 月 7 日的地表形变为 0,则这 3 年里,San Bernardino 区域(RTHS 站点附近)的地表形变速率大约为 -20 mm/a;Pomona-Ontario 区域(CLAR 站点附近)2005~2007 年的沉降速率大于该区域 2004~2005 年的沉降速率,分别约为 -19 mm/a 和 -6 mm/a;Long Beach-Santa Ana 盆地 BLSA 站附近 2004~2005 年几乎没有发生太大的形变,而 2005~2007 年的形变速率约为 -28 mm/a,LBC1 站附近 2004~2005 年和 2005~2007 年的形变速率分别约为 -8 mm/a 和 -26 mm/a,SACY 站位于受“相机镜头交界处跳变”影响的 MERIS 水汽条带中,经大气改正后 2004~2005 年的形变表现为抬升,显然不符合实际情况,但 2005~2007 年的形变则为显著的沉降。通过前面的分析可知,位于 Santa Ana 盆地中心的 SACY、盆地中心与西部之间的 BLSA 以及盆地西北部的 LBC1 是形变较大的区域。

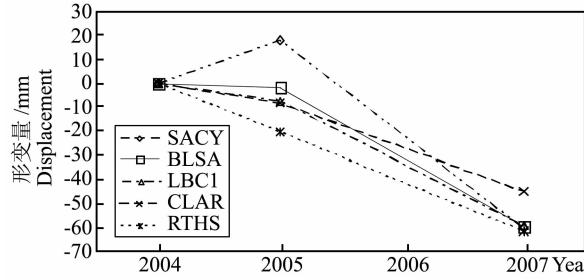


图 10 经过大气改正后的干涉图反映的地表时序变形

Fig. 10 Time series of ground deformation from atmosphere-corrected interferograms

4 结论与展望

本文选取了美国南加州洛杉矶地区 4 幅 ENVISAT ASAR 干涉图进行大气改正的研究,结果表明通过利用无云条件下的 MERIS 水汽数据改正同步获取的 ASAR 干涉图,可以显著地降低大气水汽对干涉图相位的影响,从而真实地反映地表形变等地球物理信号。与同期 GPS 探测的形变结果相比,利用 MERIS 水汽数据改正后,D-InSAR 的形变监测精

度能够有较大程度的改善。数值结果显示对于本文采用的 4 幅干涉图,经过 MERIS 水汽数据改正后 InSAR 与 GPS 差异的 RMS 分别降低了 41.7%,65.2%,19.3% 和 39.4%,平均改善程度达 41.4%,从而大大提高了合成孔径雷达干涉测量的监测精度。更重要的是,经过 MERIS 水汽改正后,从 2005~2007 年干涉图和 2004~2007 年干涉图中,清楚地识别出三处沉降最明显的区域:Long Beach-Santa Ana Basin、Pomona-Ontario 和 San Bernardino,其形变速率从 -8 mm/a 到 -28 mm/a,大部分在 -20 mm/a 左右,与这些地区 2003 年以前的形变速率基本一致。

虽然本文的改正效果不错,但在将来的研究中仍有几点值得注意:第一,大气水汽与高程的分布有关,在进行插值的时候应该考虑高程变化对水汽值的影响,与其他采用 MERIS 数据的研究一样^[36,37],本文采用的插值算法没有考虑高程因素的影响。未来的工作将着重研究考虑高程信息的 Kriging 插值方法^[16,21]与 MERIS 水汽数据结合进行大气改正;第二,虽然 MER_RR_2P 数据提供了地理编码信息、云层信息和水汽信息,但是利用 ESA 提供的资料并不能准确地判断海陆交界的区域水汽信息和薄云的存在对水汽估值的影响,而且在沿海地区 InSAR 与 MERIS 水汽配准精度不高,容易带来较大误差;第三,将 MERIS 水汽数据用于改正干涉图的大气效应局限于无云的天气条件,不利于应用在云层覆盖密度和概率较大的地区。

致 谢 感谢欧洲空间局提供的 Envisat ASAR 数据(AO-4458, 4914),美国南加州综合 GPS 网(SCIGN)提供的 GPS 数据以及 JPL 提供的 SRTM 数据。感谢中南大学戴吾蛟老师、香港理工大学蒋弥以及英国格拉斯哥大学刘鹏对本文提出的意见和给予的帮助。

参考文献(References)

- [1] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 2000, **88**(3): 333~382
- [2] Massonnet D, Feigl K L. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Review of Geophysics*, 1998, **36**(4): 441~500
- [3] 廖明生,林 磐. 雷达干涉测量学:原理与信号处理基础. 北京:测绘出版社,2003
- Liao M S, Lin H. Synthetic Aperture Radar Interferometry—Principle and Signal Processing (in Chinese). Beijing:

Publishing House of Surveying and Mapping, 2003

- [4] 张勤,赵超英,丁晓利等.利用GPS与InSAR研究西安现今地面沉降与地裂缝时空演化特征.地球物理学报,2009, **52**(5):1214~122
- Zhang Q, Zhao C Y, Ding X L, et al. Research on recent characteristics of spatial-temporal evolution and mechanism of Xi'an land subsidence and ground fissure by using GPS and InSAR techniques. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(5):1214~1222
- [5] 刘国祥,丁晓利,李志林等.使用InSAR建立DEM的试验研究.测绘学报,2001, **30**(4): 336~342
- Liu G X, Ding X L, Li Z L, et al. Experimental investigation on DEM generation through InSAR. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 2001, **30**(4): 336~342
- [6] 王超,张红,刘智等.苏州地区地面沉降的星载合成孔径雷达差分干涉测量监测.自然科学进展,2002, **12**(6): 621~625
- Wang C, Zhang H, Liu Z, et al. Monitoring Suzhou ground deformation with D-InSAR. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2002, **12**(6): 621~625
- [7] 单新建,马瑾,王长林等.利用星载D-INSAR技术获取的地表形变场提取玛尼地震震源断层参数.中国科学(D辑),2002, **32**(10): 837~844
- Shan X J, Ma J, Wang C L, et al. Extracting co-seismic deformation of the 1997 Mani earthquake with differential InSAR. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2002, **32**(10): 837~844
- [8] 蒋弥,李志伟,丁晓利等.InSAR可检测的最大最小变形梯度的函数模型研究.地球物理学报,2009, **52**(7): 1715~1724
- Jiang M, Li Z W, Ding X L, et al. A study on the maximum and minimum detectable deformation gradients resolved by InSAR. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(7): 1715~1724
- [9] Bean B R, Dutton E J. *Radio Meteorology*. New York: Dover, 1968
- [10] Massonnet D, Feigl K L, Rossi M, et al. Radar interferometry mapping of deformation in the year after the Landers earthquake. *Nature*, 1994, **369**: 227~230
- [11] Zebker H A, Rosen P A, Hensley S. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(B4):7547~7563
- [12] Williams S, Bock Y, Fang P. Integrated satellite interferometry: tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar product. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(B11): 27051~27067
- [13] Delacourt C, Briole P, Achache J. Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography: application to Etna. *Geophysical Research Letters*, 1998, **25**: 2849~2852
- [14] Webley P W, Wadge G, James I N. Determining radio wave delay by non-hydrostatic atmospheric modeling of water vapour over mountains. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2004, **29**: 139~148
- [15] Foster J, Brooks B, Cherubini T, et al. Mitigating atmospheric noise for InSAR using a high resolution weather model. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**: L16304, doi:10.1029/2006GL026781
- [16] Li Z W, Ding X L, Huang C, et al. Modeling of atmospheric effects on InSAR measurements by incorporating terrain elevation information. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, **68**:1189~1194
- [17] Webley P W, Bingley R M, Dodson A H, et al. Atmospheric water vapor correction to InSAR surface motion measurements on mountains: results from a dense GPS network on Mount Etna. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, **27**: 363~370
- [18] Li Z H, Fielding E J, Cross P, et al. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction: GPS topography-dependent turbulence model. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**: B02404, doi: 10.1029/2005JB003711
- [19] Xu C J, Wang H, Ge L L, et al. InSAR tropospheric delay mitigation by GPS observations: a case study in Tokyo area. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, **68**(6):629~638
- [20] Bonforte A, Ferretti A, Prati C, et al. Calibration of atmospheric effects on SAR interferograms by GPS and local atmosphere models: first results. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, **63**:1343~1357
- [21] 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. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, **66**:907~917
- [22] Li Z W. Modeling atmospheric effects on repeat-pass InSAR measurements [Ph. D. thesis]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2005
- [23] 宋小刚,李德仁,单新建等.基于GPS和大气传输模型的InSAR大气改正方法研究.地球物理学报,2009, **52**(5): 1156~1164
- Song X G, Li D R, Shan X J, et al. Correction of atmospheric effect in repeat-pass InSAR measurements based on GPS and atmospheric transport model. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(5):1156~1164
- [24] 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. *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110**: B03410, doi:10.1029/2004JB003446
- [25] 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. 地球物理学报, 2009, **52**(6):1457~1464
- Song X G, Li D R, Shan X J, et al. Correction of atmospheric effect in ASAR interferogram using GPS and MODIS data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(6):1457~1464
- [26] 谌华, 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. 地球物理学报, 2007, **50**(3):707~713
- Chen H, Shan X J, Zhang Y H, et al. Correction of atmospheric water vapour effects on the repeat-pass spaceborne D-INSAR by using NOAA-16/FY-1C and ASAR data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(3):707~713
- [27] Sarti F, Vadon H, Massonnet D. A method for the automatic characterization of atmospheric artifacts in SAR interferograms by correlation of multiple interferograms over the same site. Proceedings of IGARRS'99, Hamburg, Germany, 28 June~2 July 1999
- [28] Fruneau B, Sarti F. Detection of ground subsidence in the city of Paris using radar interferometry: isolation of deformation from atmospheric artifact using correlation. *Geophysical Research Letters*, 2000, **27**: 3981~3984
- [29] Remy D, Bonvalot S, Briole P, et al. Accurate measurements of tropospheric effects in volcanic areas from SAR interferometry data: application to Sakurajima volcano (Japan). *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, **213**: 299~310
- [30] Massonnet D, Feigl K. Discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferograms. *Geophysical Research Letters*, 1995, **22**(12):1537~1540
- [31] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatters in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2000, **38**(5):2202~2212
- [32] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatters in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2001, **39**:8~20
- [33] Li Z W, Ding X L, Huang C, et al. Atmospheric effects on repeat-pass InSAR measurements over Shanghai region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, **69**:1344~1356
- [34] Ding X L, Li Z W, Zhu J J, et al. Atmospheric effects on InSAR measurements and their mitigation. *Sensors*, 2008, **8**: 5426~5448
- [35] 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. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(2):349~365
- [36] 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. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**:L06816, doi:10.1029/2005GL025299
- [37] Puisségur B, Michel R, Avouac J P. Tropospheric phase delay in interferometric synthetic aperture radar estimated from meteorological model and multispectral imagery. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**: B05419, doi:10.1029/2006JB004352
- [38] Bawden G W, Thatcher W, Stein R S, et al. Tectonic contraction across Los Angeles after removal of groundwater pumping effects. *Nature*, 2001, **412**(23):812~815
- [39] Watson K M, Bock Y, Sandwell D T. Satellite interferometric observations of displacements associated with seasonal groundwater in the Los Angeles basin. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107**(B4):2074, doi:10.1029/2001JB000470
- [40] Samsonov S V, Tiampo K F, Rundle J B, et al. Application of DInSAR-GPS optimization for derivation of fine-scale surface motion maps of southern California. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2007, **45**(2):512~521
- [41] Lanari R, Lundgren P, Manzo M, et al. Satellite radar interferometry time series analysis of surface deformation for Los Angeles, California. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**: L23613, doi:10.1029/2004GL021294
- [42] Bennartz R, Fischer J. Retrieval of columnar water vapour over land from backscattered solar radiation using the Medium Resolution Imaging Spectrometer. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **78**:274~283
- [43] Baltink H K, H van der Marel, A G A van der Hoeven. Integrated atmospheric water vapor estimates from a regional GPS network. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107**(D3):4025
- [44] Li Z W, Ding X L, Huang C, et al. Improved filtering parameter determination for the Goldstein radar interferogram filter. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2008, **63**(6):621~634
- [45] Farr T G, Kobrick M. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. *EOS Transactions*, 2000, **81**(48): 583~585
- [46] Hanssen R H. Radar Interferometry—Data Interpretation and Error Analysis. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001
- [47] Ng A H, Chang H S, Zhang K, et al. Deformation mapping in three dimensions for underground mining using InSAR-

- Southern highland coal field in New South Wales, Australia. *International Journal of Remote Sensing*, in press
- [48] Delwart S, Preusker R, Bourg L, et al. MERIS in-flight spectral calibration. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, **28**(3~4):479~496
- [49] Li Z H, Fielding E J, Cross P, et al. Advanced InSAR atmospheric correction: MERIS/MODIS combination and stacked water vapour models. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, **30**(13): 3343~3363
- [50] Lu Z, Danskin W R. InSAR analysis of natural recharge to define structure of a ground-water basin, San Bernardino, California. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(13): 2661~2664

(本文编辑 何 燕)