

文章编号:1671-8860(2008)07-0723-04

文献标志码:A

# InSAR 大气水汽改正模型的比较应用研究

鄢子平<sup>1</sup> 李振洪<sup>2</sup>

(1 武汉大学期刊社,武汉市珞喻路129号,430079)

(2 伦敦学院大学测绘工程系,英国伦敦,WC1E 6BT)

**摘要:**对基于 GPS 数据的大气水汽扰动模型(GPS topography—dependent turbulence model, GTTM)和 GPS/MODIS 集成的大气水汽改正模型进行了比较研究。试验证明, GTTM 模型和 GPS/MODIS 集成模型的改正方法都可以大大降低大气水汽对 InSAR 测量地表形变量精度的影响。另外,当两种模型都用于改正 InSAR 观测值时,它们具有很强的互补性。

**关键词:**InSAR; GTTM; MODIS; 大气改正

中图法分类号:P228.41

在过去的 20 a 间,重复轨道合成孔径雷达干涉测量(InSAR)已被广泛地应用于测量地球表面的地形和地表形变监测中,其空间分辨率高达 20 m。与其他天文和空间大地测量技术一样,重复轨道 InSAR 技术受大气尤其是大气水汽的影响。1995 年,Massonnet 等提出可以用两两比较逻辑法从其他信号中分离出大气的影响,这种方法的缺陷是无法对大气影响进行准确的量化<sup>[1]</sup>;1998 年,Delacourt 等运用一个对流层大气改正模型去除了 ERS 干涉影像中的两个条纹,改正后,干涉影像的精度约为 1 个条纹(即 2.8 cm)<sup>[2]</sup>;1999 年,Ferretti 等在考虑基线、相干性和大气影响的基础上发展了一种加权平均法来构建 DEM,即多基线法<sup>[3]</sup>;2001 年,Bonforte 等利用 GPS 观测数据求出了天顶方向湿大气延迟,在和由 Saastamoinen 模型以及地基气象观测数据计算得到的天顶方向湿大气延迟进行比较后发现,两者大致相当<sup>[4]</sup>;2002 年,Wadge 等运用一个区域性的数值动力模型 NH3D 来模拟意大利 Etna 火山地区由于水汽而引起的大气延迟,结果发现,NH3D 的结果与 ERS-2 干涉影像和 GPS 的估值大体一致<sup>[5]</sup>;同年,Crosetto 等提出了随机滤波法来削弱大气对 InSAR 干涉影像的影响<sup>[6]</sup>。

现有的研究结果表明,大气的影响(尤其是大

气水汽的影响)大大限制了 InSAR 在地表形变监测方面的应用,尤其是当地表形变量比较小时。因此,在 InSAR 数据处理和干涉影像的解译过程中,必须研究和分析大气的影响,并加以处理。本文主要对基于 GPS 数据的大气水汽扰动模型(GTTM)<sup>[7]</sup>和基于 GPS /MODIS(中尺度分辨率成像光谱辐射仪)集成<sup>[8]</sup>的大气水汽改正模型进行了比较研究。

## 1 大气水汽改正模型

重复轨道 InSAR 解缠后的相位不仅包含地表形变信号,还包含地形起伏的信息、卫星轨道误差和大气(主要是水汽)等的影响。就应用于地表形变监测的差分 InSAR 而言,地形起伏相位可以通过精密的数字高程模型(DEM)来消除,而 DEM 本身误差的影响与影像对的垂直空间基线(即卫星间的垂直距离)有关,垂直基线越短,DEM 误差对地表形变量的影响越小,因此,短垂直基线的影像对 DEM 误差的影响很小,甚至可以忽略不计。卫星轨道误差表现为长波段的信号,对区域性的地表形变量而言,可利用最佳拟合平面或曲面予以削弱。大气影响则可通过独立的观测值(如 GPS 和中尺度分辨率成像光谱辐射

仪/MODIS)进行估计,并加以削弱。

### 1.1 基于 GPS 的地形扰动模型(GTTM)

InSAR 和 GPS 集成的概念最早由 Bock 等于 1997 年提出<sup>[9]</sup>。1998 年,Williams 等做了一个利用 GPS 数据削弱干涉影像大气影响的模拟实验<sup>[10]</sup>,结果表明,大气的影响遵循幂律模型,通过消除波段的影响,可以达到削弱大气噪音的目的。因此,结合一定的空间模拟模型,利用 GPS 网估算出的对流层(或水汽含量)可削弱 InSAR 干涉影像的大气影响。另外,InSAR 观测值大气改正的效果与 GPS 接收机的空间分布相关,但目前 GPS 网的分布对于 InSAR 的大气改正而言不是最优的。

1998 年,Jarlemark 等提出了一个针对空间内插湿延迟与地形无关的大气水汽扰动方法<sup>[11]</sup>,当在不同的方向和时间使用其扰动模型内插天顶湿延迟(zenith wet delay, ZWD)时,将会产生较小的 RMS 误差。需要指出的是,当地表起伏较大时,该方法就不再适用了。2005 年,李振洪提出了基于 GPS 的地形扰动模型(GTTM)<sup>[7,12]</sup>,其最大的特点是考虑了与地形相关的大气水汽的影响。GTTM 大气改正模型基于以下两个主要的假设: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<sup>[7]</sup>。

GTTM 改正模型在南加州的应用表明,GTTM 不仅可以消除长波段大气水汽的影响,还可以大大削弱与地形相关的短波段水汽的影响<sup>[7,12,13]</sup>。利用 GPS 削弱 InSAR 干涉影像的水汽影响后,ERS Tandem 解缠后的相位残差由改正前约 1.0 cm 降低到改正后约 0.5 cm<sup>[7]</sup>,这表

明采用 GTTM 大气改正方法后,干涉相位变得更加平滑,即噪声(主要为大气影响)减少。

### 1.2 GPS/MODIS 集成大气改正模型

2005 年,李振洪提出并实现了利用 MODIS 水汽数据改正 InSAR 干涉影像大气的影响,即 GPS/MODIS 集成大气改正方法<sup>[8,13]</sup>。该方法是利用 GPS 数据校准 MODIS 水汽数据的范围,并利用改进的逆距离加权 IIDW 插值方法拟合受云的影响而无大气水汽估值的像素。

由 GPS 改正 MODIS 近红外大气水汽方法的主要步骤如下<sup>[8]</sup>:① 探测出不受云影响的 MODIS 可降水汽(precipitable water vapour, PWV)估值;② 比较被选择的 MODIS PWV 估值和 GPS 测得的 PWV 估值,并获得一个线性的 GPS 改正模型;③ 利用 GPS 改正模型校正 MODIS PWV 估值;④ 利用 IIDW 拟合内插受云的影响而无有效 PWV 估值的像素。

## 2 试验研究

美国南加州 GPS 网是世界上密度最大的区域性 GPS 连续监测网络之一,其测站遍布整个南加州,测站间距从几 km 到几十 km 不等。本文选择美国南加州地区作为测试大气改正方法的试验区域,利用 JPL/Caltech ROI\_PAC 软件(Version 2.3)<sup>[14-16]</sup>对 ERS-2 SAR 影像进行处理,并采用 GTTM 和 GPS/MODIS 两种大气改正方法进行比较。为了评估两种大气水汽改正模型的特性,本文选取 2002-09-02~12-16 的差分干涉图像进行比较分析,结果如图 1 所示。

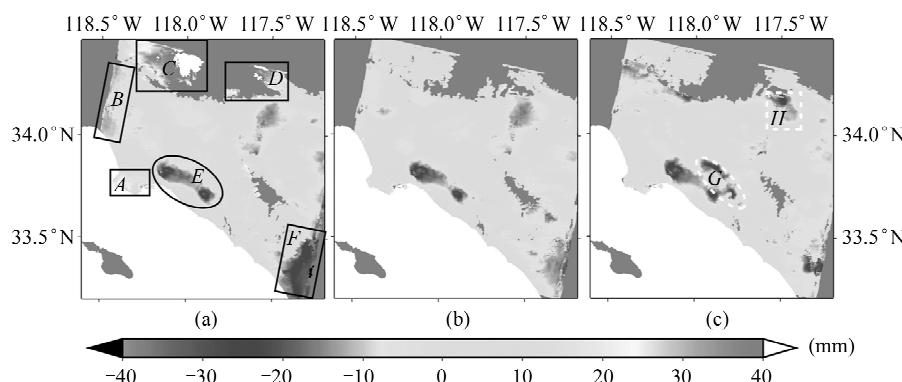


图 1 GTTM 和 GPS/MODIS 两种大气改正方法试验比较

Fig. 1 Comparison Between GTTM and GPS/MODIS

图 1 显示的是卫星至地表方向上的距离变化,正值表示地表远离卫星,负值表示地表靠近卫星。图 1(a)中,黑色矩形表示受水汽影响的区

域,黑色椭圆形表示 Long Beach-Santa Ana 盆地的地表隆起。从图 1 可以看出,GTMM 模型和 GPS/MODIS 集成模型的改正方法大大降低了大

气水汽对区域 A、B、C、D、F 的影响。经大气改正后,干涉相位变得平滑多了,解缠后的干涉相位变化在大气改正前为 2.48 rad,经过 GTTM 大气方法改正后变为 1.34 rad,而经过 GPS/MODIS 大气方法改正后变为 1.47 rad。比较图 1(b)和图 1(c)可以得出,区域 G 和 H(即图 1(c)中白虚线椭圆形和白虚线矩形)由于云的影响而导致 MODIS 大气水汽误差,进而引起大气水汽改正的不确定性。

为了进一步验证大气改正方法的效果,将 GPS 测得的三维形变量映射到卫星至地面的方向上,并与 InSAR 结果进行比较(图 2)。从图 2 可以看出,大气水汽改正前,InSAR 在卫星至地面方向上的形变量和 GPS 形变量的差值中误差为 1.1 cm; 经过 GTTM 改正后,减少到 0.6 cm; 而经过 GPS/MODIS 改正后,减少到 0.5 cm,这说明两种改正方法都成功地降低了大气效应对干涉产生的影响。需要指出的是,这个比较并不说明 GPS/MODIS 模型比 GTTM 模型更优,但是可以得出这样的结论,即当两种模型都用于改正 InSAR 观测值时,它们具有很强的互补性(表 1)。

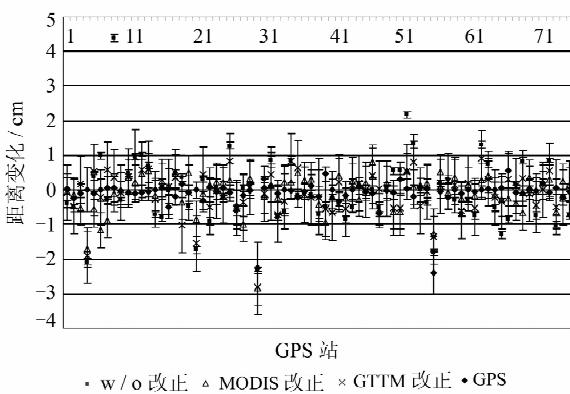


图 2 通过 GPS 和 InSAR 技术获取的卫星至地球表面方向上的距离变化比较图

Fig. 2 Comparison of Range Changes in the Satellite Line of Sight Derived from GPS and InSAR Measurements

表 1 不同改正模型的比较

Tab. 1 Comparisons of Different Correction Models

	GTTM	GPS/MODIS 集成
观测值	GPS 连续监测 网络(CGPS)	①至少 1 个 GPS 测站; ②同时或相近时刻接收的 MODIS 数据
适用性	ERS-1/2, ASAR	ERS-2, ASAR
观测期	任何时刻	白天
覆盖区域	区域性	全球
空间分辨率	几 km 至几百 km	约 1 km
时间间隔	连续	0~90 min
对云的敏感度	无	有
ZWD 精度	约 8 mm	5%~10% 或 10~12 mm (PWV: 1.6~2.0 mm)

从表 1 可以看出,一方面, GPS 可连续地获取高时间分辨率(如 30 s,甚至 20 Hz)的观测值,而且从 GPS 导出的大气时延估计值对云不敏感。然而,目前世界上只有少数几个密集的连续 GPS 监测网络,即使是美国南加州 GPS 网——世界上密度最大的区域性 GPS 连续监测网络之一,其空间分辨率也是有限的。另一方面,MODIS 具有全球覆盖的特点,而且其空间分辨率约为 1 km,但 MODIS 近红外大气水汽数据只能在白天获取。此外,MODIS 近红外大气水汽数据对云敏感,具有较大的不确定性,至少需要 1 个 GPS 站来对 MODIS 数据进行校准。

### 3 结语

由于大气水汽的影响,传统的 InSAR 形变量的监测精度往往只能限制在 cm 级。随着 InSAR 技术研究的深入以及应用的推广,InSAR 观测值的大气水汽影响日益受到重视。通过对 GTTM 和 GPS/MODIS 大气改正方法的比较,有助于识别并减弱大气水汽数据所引起的误差,从而以较高的精度(约 5 mm)成功地提取出真正的形变信息,并进行合理的物理解释。

### 参 考 文 献

- [1] Massonnet D, Feigl K L. Discrimination of Geophysical Phenomena in Satellite Radar Interferograms[J]. Geophysical Research Letters, 1995, 22 (12): 1 537-1 540
- [2] Delacourt C, Briole P, Achache J. Tropospheric Corrections of SAR Interferograms with Strong Topography, Application to Etna[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25 (15): 2 849-2 852
- [3] 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
- [4] Bonforte A, Ferretti A, Prati C, et al. Calibration of Atmospheric Effects on SAR Interferograms by GPS and Local Atmosphere Models: First Results [J]. Journal of Atmosphere and Solar-Terrestrial Physics, 2001, 63: 775-788
- [5] Wadge G, Webley P W, James I N, et al. Atmospheric Models, GPS and InSAR Measurements of the Tropospheric Water Vapour Field over Mount Etna[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29 (19): 1 905
- [6] Crosetto M, Tscharnert C C, Crippa B, et al. Sub-

- sidence Monitoring Using SAR Interferometry: Reduction of the Atmospheric Effects Using Stochastic Filtering [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29 (9): 26
- [7] Li Zhenghong, 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
- [8] Li Zhenghong, 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): 3 410
- [9] Bock Y, Williams S D P. Integrated Satellite Interferometry in Southern California [J]. *EOS Transactions on American Geophysical Union*, 1997, 78 (29): 299-300
- [10] Williams S, Bock Y, Fang P. Integrated Satellite Interferometry: Troposphere Noise, GPS Estimates, and Implications for Synthetic Aperture Radar Products [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103 (B11): 27 051-27 067
- [11] Jarlemark O J, Emardson T R. Strategies for Spatial and Temporal Extrapolation and Interpolation of Wet Delay [J]. *Journal of Geodesy*, 1998, 72: 350-355
- [12] Li Zhenhong, 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*, Long Beach, California, 2005
- [13] Li Zhenghong. Correction of Atmospheric Water Vapour Effects on Repeat-Pass SAR Interferometry Using GPS, MODIS and MERIS Data [D]. London: University College London, 2005
- [14] Menzel W P, Wylie D P, Strabala K I. Seven Years of Global Cirrus Cloud Statistics Using HIRS [C]. *IRS Symposium: Current Problems in Atmospheric Radiation*, Fairbanks, AK, 1996
- [15] Wylie D P, Menzel W P. Eight Years of High Cloud Statistics Using HIRS [J]. *Journal of Climate*, 1999, 12 (1): 170-184
- [16] Rosen P A, Hensley S, Peltzer G, et al. Updated Repeat Orbit Interferometry Package Released [J]. *EOS Transactions on American Geophysical Union*, 2004, 85 (5): 47

**第一作者简介:**鄢子平,硕士,编辑。现主要从事GPS应用研究及编辑学的研究。

E-mail:gsis\_yzp@163.com

## Comparison of Atmospheric Water Vapour Correction Models for InSAR Measurements

YAN Ziping<sup>1</sup> LI Zhenghong<sup>2</sup>

(1 Journals Press of Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Department of Geomatic Engineering, University College London, Gower Street, London WC1E 6BT, United Kingdom)

**Abstract:** A comparison between GPS topography-dependent turbulence model (GTTM) and GPS/MODIS integrated water vapour correction model is performed. The experimental results show that both correction models are able to improve InSAR derived deformation signals from 10 mm to 5 mm after correction by reducing water vapour effects on InSAR measurements. It can also be concluded that the GTTM and GPS/MODIS integrated models are complementary when correcting InSAR measurements.

**Key words:** InSAR; GTTM; MODIS; atmospheric correction