

## 利用 MODIS 水汽数据进行 ASAR 干涉测量大气改正研究

刘小阳, 孙广通, 宋 萍, 刘 军, 李 峰

(防灾科技学院 防灾工程系, 河北 三河 065201)

**摘 要:** 对流层水汽引起的大气相位延迟是制约重复轨道 InSAR 高精度测量的重要因素之一。为有效解决 InSAR 中大气相位延迟的问题, 对 InSAR 中大气延迟误差进行了分析, 研究了利用 MODIS 水汽数据对 ASAR 干涉图大气改正的方法及其关键技术, 以太原地区的 ASAR 干涉图为例, 对其进行大气改正。实验结果表明, MODIS/ASAR 大气改正方法可以显著地提高干涉图的质量, 同时形变反演的精度也得到了明显的改善, 验证了 MODIS 与 ASAR 数据融合获取地表形变信息的必要性和可靠性。

**关键词:** 合成孔径雷达; MODIS; ASAR; 大气改正; 地表形变

**中图分类号:** P237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)12-4111-06

## Correction of atmospheric effect in ASAR interferogram using MODIS data

Liu Xiaoyang, Sun Guangtong, Song Ping, Liu Jun, Li Feng

(Department of Disaster Prevention Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China)

**Abstract:** The atmospheric phase delay caused by tropospheric water vapor is an important factor to the precision of repeat pass InSAR. In order to solve the problems in InSAR atmospheric phase delay effectively, the atmospheric delay error of InSAR was analyzed, and the atmospheric correction methods and key technology using MODIS water vapor data for ASAR interferograms were presented. Then, the atmospheric corrections was conducted using ASAR interferometric pair over the Taiyuan region as examples. The experimental results show that the quality of interferogram can be improved greatly by the MODIS/ASAR atmospheric correction method, and the deformation inversion accuracy can be significantly improved, the necessity and reliability of MODIS and ASAR data fusion form obtaining information of surface deformation are aslo verified.

**Key words:** InSAR; MODIS; ASAR; atmospheric correction; surface deformation

收稿日期: 2014-04-13; 修订日期: 2014-05-15

基金项目: 中国地震局教师科研基金项目(20120102)

作者简介: 刘小阳(1978-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事遥感图像处理、工程测量的教学与研究工作。Email: liuxiaoyang1209@163.com

## 0 引言

合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)作为一种新的对地观测手段<sup>[1]</sup>,具有全天时、全天候、覆盖广、分辨率高等特点,在数字高程模型的建立和地面形变监测等领域具有先天优势,理论上可以获得米级的高程精度和毫米级的形变精度。但在实际应用中,影响其精度的因素很多,大气对信号的延迟就是其中一个重要因素。大气状况变幻莫测,极大地限制了 InSAR 技术在形变监测中的应用。现有的研究表明,干涉测量两幅影像获取时刻大气水汽的变化是产生大气相位延迟的主要因素,大气相对湿度在时空 20% 的变化可引起 80~290 m 的高程误差和 10~14 cm 的形变测量误差<sup>[2]</sup>,这极大降低了 InSAR 测量的精度。因此,必须采取有效手段减弱大气影响。

为了解决大气尤其是水汽问题,国际和国内对此进行了深入研究并提出了若干大气效应模拟和去除的方法,如基于数据本身特性去除大气影响的线性校正法<sup>[3]</sup>、相位积累法<sup>[4]</sup>和永久性散射体法<sup>[5]</sup>,借助于外部独立观测数据的地面气象信息建模法<sup>[6]</sup>、数值大气模拟法<sup>[7]</sup>和连续 GPS(CGPS)观测网法<sup>[8]</sup>等。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,现有地面气象信息建模法和数值大气模拟法所建立的大气改正模型外推效果并不理想。连续运行 GPS 站可以高精度的探测大气水汽,但目前 GPS 监测网络密度不够,覆盖范围有限,空间分辨率低,站点数据需要内插,进而降低了改正精度。

随着卫星遥感技术的不断发展,利用对地探测卫星来获取大气水汽含量及时空变化成为最有效的途径之一,为 InSAR 进行大气改正的提供一个有效手段。MODIS(中分辨率成像光谱仪)搭载在 Terra 卫星上,其过境时间与 ENVISAT 雷达卫星非常接近,MODIS 水汽产品与 ASAR 影像的成像时间相差仅半个小时,为利用 MODIS 水汽产品对 ASAR 干涉图大气改正提供了前提条件<sup>[9-10]</sup>。文中在深入分析 InSAR 测量中的大气影响及其误差的基础上,利用 MODIS 水汽数据对 ASAR 数据差分干涉相位进行大气改正,并与实测数据进行比较,验证了 MODIS

水汽数据改正 InSAR 干涉图中大气效应的精度和可靠性。

## 1 InSAR 测量中大气延迟误差分析

### 1.1 InSAR 干涉相位中大气延迟误差分析

重复轨道干涉测量中获取的两幅影像回波信号可以表达为<sup>[11]</sup>:

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

式中:  $R_1$ 、 $R_2$  为雷达卫星与地面点的距离;  $\Delta R_1$ 、 $\Delta R_2$  为大气层造成的雷达信号延迟相位;  $\lambda$  为雷达波长。

两幅影像的回波信号进行共轭相乘,得到干涉相位:

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

式中:  $\frac{4\pi}{\lambda} (\Delta R_1 - \Delta R_2)$  即为大气延迟相位。对于重复轨道干涉测量来说,不同时刻的大气条件一般是不相同的,必须要考虑到大气延迟相位,由于延迟量主要由水汽的变化引起,故大气延迟相位可以表示为:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi ZWD}{\lambda \cos\theta} \quad (3)$$

式中:  $\Delta\varphi$  表示相位延迟;  $\theta$  为雷达波入射角;  $ZWD$  为大气水汽引起的延迟量。

对于重复轨道干涉测量,时间间隔大于一天的两幅雷达影像的  $ZWD$  是非相关的<sup>[12]</sup>,设每次  $ZWD$  的标准差为  $\sigma_{ZWD}$ ,干涉相位是两幅雷达影像的相位差,依据误差传播定律,由公式(3)可得  $ZWD$  对干涉图的影响为:

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

相对于 ASAR 影像,雷达波长  $\lambda$  为 56.2 mm,中心入射角  $\theta$  为 23.3°; 10~12 mm 的  $ZWD$  误差可引起干涉图 0.55~0.66 个条纹变化。

### 1.2 InSAR 高程测量中大气延迟误差分析

InSAR 可以建立高程模型,高程与干涉相位的关系可表示为:

$$h = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{R \sin\theta}{B_\perp} \varphi \quad (5)$$

依据误差传播定律,由公式(4)与公式(5)可推导出 InSAR 测高误差与 ZWD 误差的关系如下:

$$\sigma_h = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{R \sin \theta}{B_{\perp}} \sigma_{\varphi} = \frac{\sqrt{2} \cdot R \tan \theta}{B_{\perp}} \sigma_{ZWD} \quad (6)$$

相对于 ASAR 影像,中心入射角  $\theta$  为  $23.3^{\circ}$ ,卫星距离地面的斜距  $R$  大约为  $780 \text{ km}$ ,若两幅干涉影像的空间垂直基线距为  $200 \text{ m}$  时, $10 \sim 12 \text{ mm}$  的 ZWD 误差可以引起  $23 \sim 28 \text{ m}$  的高程误差。

### 1.3 InSAR 形变测量中大气延迟误差分析

差分 InSAR(DInSAR)可以监测微小形变量,根据形变监测的原理,视线向形变测量误差与相位误差的关系为:

$$\sigma_{\Delta\rho} = \frac{\lambda}{4\pi} \sigma_{\varphi} \quad (7)$$

依据误差传播定律,由公式(4)和公式(7)可推导出视线向形变误差与 ZWD 误差的关系为:

$$\sigma_{\Delta\rho} = \frac{\sqrt{2}}{\cos \theta} \sigma_{ZWD} \quad (8)$$

相对于 ASAR 影像,中心入射角  $\theta$  为  $23.3^{\circ}$ , $10 \sim 12 \text{ mm}$  的 ZWD 误差引起的形变误差为  $15 \sim 19 \text{ mm}$ 。

## 2 MODIS/ASAR 大气改正方法

### 2.1 MODIS 水汽产品简介

MODIS 水汽数据产品有两种:Terra 平台的 MOD05\_L2 和 Aqua 平台的 MYD05\_L2,两者均可以通过 NASA 网站免费下载。考虑到 Terra 卫星与 ENVISAT 卫星过境时间比较接近,相差仅半个小时,因此在对 ENVISAT ASAR 数据进行大气改正时,采用来自 Terra 平台 MOD05\_L2 水汽产品进行大气改正研究。MOD05\_L2 产品所包含的数据的空间分辨率为  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  或  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ ,其水汽产品通过近红外水汽算法生成,而近红外算法只能获得白天晴朗陆地区域上以及多云陆地和海洋区域内云上的柱体水汽量,因此,在对 MODIS 水汽产品处理中需要利用云掩模产品对云区进行标识处理。

### 2.2 综合 MODIS/ASAR 大气改正模型

综合 MODIS/ASAR 大气改正模型的基本思想利用 MODIS 水汽数据对 ASAR 干涉测量中的大气延迟进行改正<sup>[13]</sup>。具体做法为,首先将 MODIS 可降水汽量 PWV(Precipitable Water Vapor)转换为天顶湿延迟 ZWD,然后按照雷达影像差分的方式对两幅天

顶湿延迟 ZWD 进行差分,从而获得与干涉图相对应的天顶路径延迟差分图 ZPDDM,最后将雷达干涉图与天顶路径延迟差分图进行差分,从而可以有效去除大气延迟的影响。该处理流程如图 1 所示。

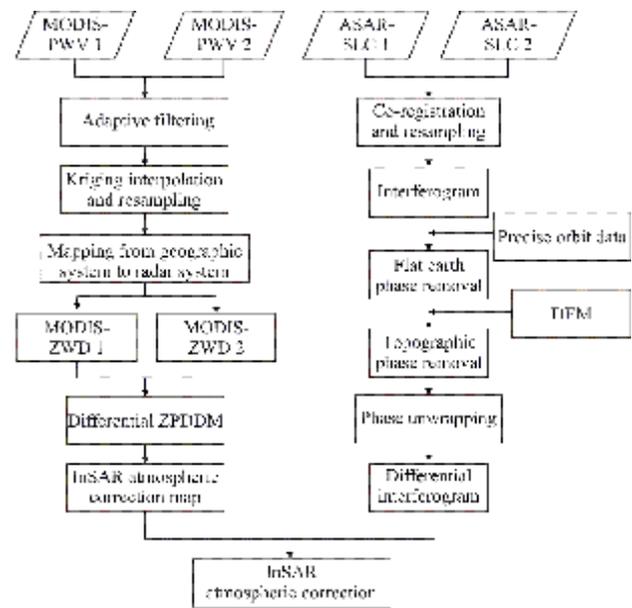


图 1 MODIS/ASAR 大气改正流程图

Fig.1 Flowchart of MODIS/ASAR atmospheric correction method

### 2.2.1 MODIS 水汽数据预处理

MOD05\_L2 水汽产品中包括近红外水汽产品与云掩模产品。利用云掩模产品来对 MODIS 可降水汽(MODIS-PWV)标识云区(置为 0),由于近红外水汽产品为正弦曲线投影(Sinusoidal),需对其进行投影变换,转换到 UTM 投影。同时,由于 MODIS 近红外水汽反演算法利用的波段为 2、5 和 19 波段,而 MODIS 数据的 5 波段由于波谱的相互干涉作用导致“条带”现象非常严重,因此,在利用 MODIS 水汽产品前需要进行去条带处理,文中采用自适应滤波的方法对条带噪声进行去除。

### 2.2.2 MODIS 近红外水汽数据生成 InSAR 大气延迟相位改正图

天顶湿延迟描述的是雷达信号传播过程中由于水汽存在而引起的路径延迟,它可以通过可降水汽计算出来,二者存在如下的转换关系:

$$ZWD = \left[ 10^{-6} \rho_w \cdot \left( k' + \frac{k}{T_M} \right) \cdot R_v \right] \cdot PWV = \Pi \cdot PWV \quad (9)$$

式中: $\rho_w$ 为液态水密度; $k'$ 和  $k$ 为大气折射常数; $R_v$ 是大气常数; $T_M$ 是对流层的加权平均温度; $\Pi$ 为比

因子,通常数值取值范围在 6.0~6.5 之间<sup>[9]</sup>,在个别地方可以达到 7.0。在文中采用一个平均的转换因子 6.2。

MODIS 水汽产品的空间分辨率为 1 km,比 ASAR 影像分辨率要低很多,且 MODIS 水汽产品受云的影响,进行云标识会出现一些“空洞”,因此,需要对 MODIS 水汽数据进行插值和重采样,获得与 ASAR 干涉图分辨率一致的天顶水汽延迟图。对于重复轨道干涉测量,对获得的对应于主辅 SAR 影像成像时间的天顶湿延迟图差分处理,得到 ZPDDM。

为了有效去除干涉图中的水汽影响,将 ZPDDM 从几何坐标系转换到雷达坐标系是必要的。利用 DEM 与精轨信息,可以模拟出雷达影像强度图,同时可以获得一个转换表。将模拟出的强度图与 SAR 影像进行配准,获得配准偏移量。利用获得的转换表与配准偏移量,就可以将 ZPDDM 从几何坐标系转换到雷达斜距坐标系下。最后,将 ZPDDM 通过公式(10)转换为延迟相位信息,并映射到雷达视线方向,就得到 InSAR 大气延迟相位改正图。

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\text{ZPDDM}}{\cos\theta} \quad (10)$$

式中: $\Delta\varphi$  表示大气引起的双向路径差分相位; $\theta$  为雷达入射角。

### 3 实验与结果分析

#### 3.1 实验区资料情况介绍

此次实验选择我国地面沉降比较严重的太原地区作为研究区域,利用成像时间分别为 2009-07-17 与 2009-08-21 的两幅 ASAR 影像进行实验与分析。在进行差分干涉测量处理中,为有效去除高程相位的影响,使用了荷兰 Delft 大学空间研究中心提供的 ASAR 精密轨道数据和美国 JPL 提供的 SRTM 高程数据。在建立大气改正模型中利用了与 ASAR 成像时间准同步的 MODIS 水汽数据。

#### 3.2 建立 MODIS/ASAR 大气改正模型

由于此次实验获取的 MODIS 水汽数据条带噪声非常严重,在处理之前,利用自适应滤波方法对 MODIS 水汽数据进行了去条带处理。按照目标区域的经纬度范围裁剪出与 2009-07-17 和 2009-08-21

对应的 MODIS 水汽数据图,其分辨率为 1 km,为了使其分辨率与干涉图一致,并有效填补云掩膜造成的数据漏洞,利用 Kriging 内插法对该水汽数据进行内插和重采样。图 2 给出了两幅研究区域内的 MODIS 水汽场。对两水汽场进行差分并转换为延迟量,生成大气延迟改正图,为了抑制噪声,进行低通滤波处理。图 3 为干涉图所对应的大气延迟改正图。

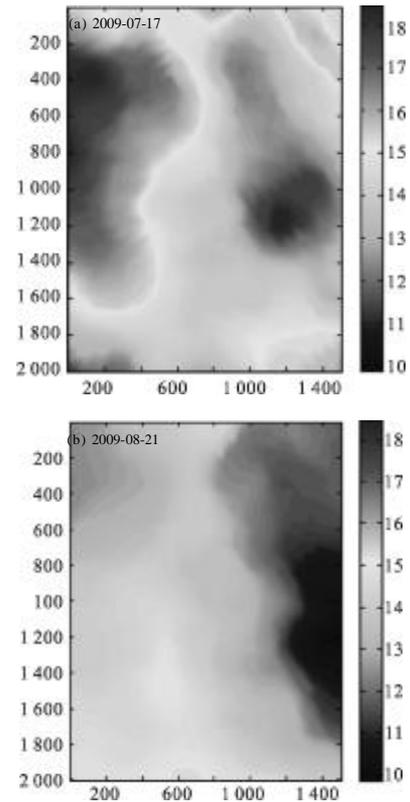


图 2 MODIS 可降水汽图(mm)

Fig.2 MODIS-PWV images(mm)

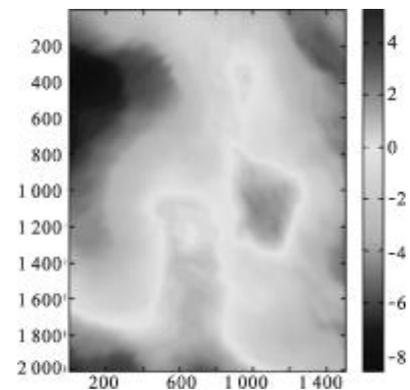


图 3 InSAR 大气延迟改正图(rad)

Fig.3 InSAR atmospheric correction map(rad)

### 3.3 大气改正结果与分析

对差分干涉图利用计算出的 InSAR 大气改正延迟相位图进行改正, 最终获得大气效应纠正后的形变图。大气改正前后的形变图如图 4 所示。

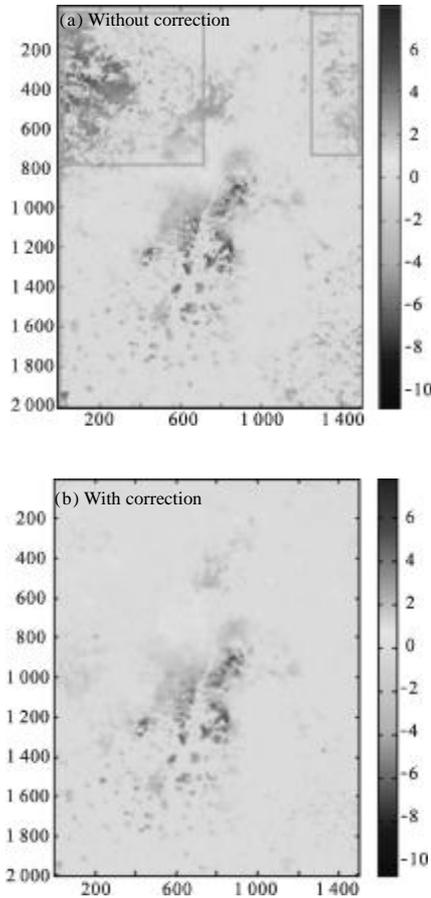


图 4 大气改正前后 InSAR 形变图(cm)

Fig.4 Deformation map derived from InSAR without atmospheric correction and with correction (cm)

通过对图 4 的对比分析, 发现大气效应对形变测量的影响非常明显(方框圈出), 这降低了 InSAR 获得的形变量的精度, 而经过大气改正后, 绝大部分的大气延迟相位得到了明显去除。为了量化评价标准, 采用干涉图标准偏差评价校正前后效果, 改正前干涉图的标准差为 2.88 rad, 改正后干涉图的标准差为 2.18 rad, 干涉图的质量提高了 24.3%, 提高效果明显。

为了进一步验证文中发展的大气模型的精度和可靠性, 利用太原市水务局实测的该地区同时段的 10 个水准数据 (这 10 个水准点位置标定在 SAR 影像如图 5 所示) 与 InSAR 大气改正前后获得的形变

量进行对比, 图 6 显示了大气改正前后 InSAR 测得的形变量与实测水准数据的对比情况。对比发现, 大气改正前二者的中误差为 1.40 cm, 大气改正后二者的中误差降低为 1.09 cm, 精度提高了 22.1%, 进一步说明 MODIS/ASAR 大气改正方法的有效性和可靠性。

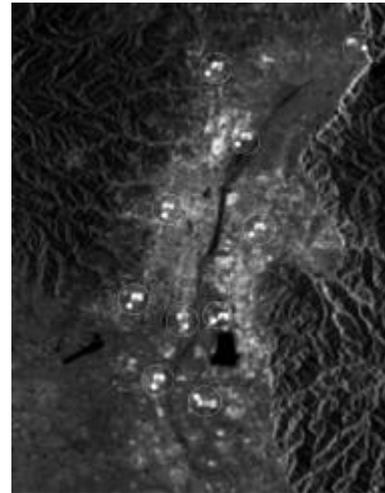


图 5 水准点分布情况

Fig.5 Distribution of leveling points

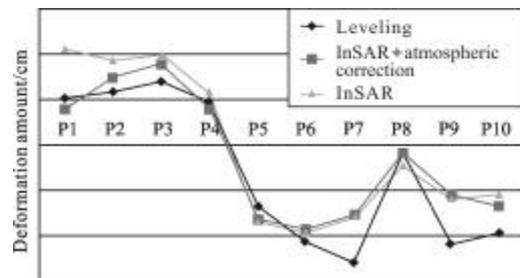


图 6 InSAR 大气改正前后对比图

Fig.6 InSAR atmospheric correction before and after comparison chart

## 4 结论

文中深入研究了 MODIS/ASAR 大气改正模型, 并利用国内地面沉降严重的太原地区 ASAR 影像进行大气改正研究, 通过对大气水汽改正前后的形变量对比发现, 利用 MODIS 水汽产品可以有效的降低大气水汽对干涉图相位的影响, 从而提高 InSAR 监测地表形变的精度, 与实测水准数据相比, 大气改正后, 二者的吻合度明显提高, 改善程度提高了 22.1%, 验证了 MODIS 与 ASAR 数据融合获取地表形变信息的必要性和可靠性。

## 参考文献:

- [1] Massonnet D, Feigl K, Rossi M, et al. Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake[J]. *Nature*, 1994, 369: 227-230.
- [2] Zebker H A, Rosen P A, Hensley S. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B4): 7547-7563.
- [3] Massonnet D, Feigl K L. discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferograms [J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(12): 1537-1540.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39 (1): 8-20.
- [7] Delacourt C , Briole P , Achache J . Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography: application to Etna [J]. *Geophysical Research Letters* , 1998 , 25 (15) : 2849-2852.
- [8] 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.
- [9] 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, 2005, 110(B03410): 1-10.
- [10] Liu Shengwei, Zhang Chaolin, Guo Xiaofang, et al. Theoretical study for application of MODIS atmospheric water vapor retrieval to InSAR atmospheric correction[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007(3): 367-372.(in Chinese)  
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.
- [11] Ding X L, Li Z W, Zhu J J, et al. Atmospheric effects on InSAR measurements and their mitigation [J]. *Sensors*, 2008 (8): 5426-5448.
- [12] Emardson 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.
- [13] Sun Guangtong. Study on retrieval of ground deformation using time-series InSAR and atmospheric phase correction. [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2011.  
孙广通. 时间序列 InSAR 形变反演及大气相位改正技术研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2011.