

InSAR 观测值大气改正方法的研究进展

吴云孙¹ 李振洪² 刘经南³ 许才军¹

(1 武汉大学测绘学院, 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)

(3 武汉大学校长办公室, 武汉市珞珈山, 430072)

摘要:介绍了国际上 InSAR 观测值大气改正方法最新的研究进展,应用实例证明了由于大气(尤其是水汽)的影响,传统的 InSAR 形变量的监测精度往往只能限制在 cm 级;而利用 GPS 数据,通过基于地形的 GPS 扰动模型(GTTM),大幅度削弱了大气对干涉影像的影响,并成功地探测出了美国洛杉矶地区明显的季节性地表形变,形变量精度可提高到 5 mm 左右。通过与 GPS/MODIS 集成大气改正模型的结果的比较表明,GTTM 和 GPS/MODIS 两种大气改正模型在削弱 InSAR 观测值大气水汽影响方面具有很强的互补性。

关键词:InSAR; MODIS; 大气水汽; 地表形变; 大气改正

中图分类号:T P751.1; P237.9

重复轨道合成孔径雷达干涉测量(InSAR)是获取 m 级精度、数十 m 空间分辨率地面高程信息的一种高效手段^[1,2],其差分技术(DInSAR)还可以用于探测亚 cm 级的微小地表形变^[3]。自从 20 世纪 90 年代星载 SAR 卫星(尤其是 ERS-1/2 和 ENVISAT)发射以来,重复轨道 InSAR 差分技术已成功应用于不同领域的地表形变监测,如油田快速沉降监测、地震研究、火山监测、冰川运动和极地研究。

1994 年,Massonnet 等在研究 1992 年 Larders 地震时,第一次在 InSAR 干涉影像中注意到大气影响产生的干涉条纹^[4];1995 年,Goldstein 在一幅由 SIR-C 数据生成的加利福尼亚 Mojave 沙漠地区的 InSAR 干涉影像中发现,单程路径延迟高达 2.8 cm,其中误差约为 0.3 cm^[5];1997 年,Zebker 等认为,相对湿度 20% 的时空变化可导致形变观测值误差约为 10~14 cm^[6]。

现有的研究结果一再表明,大气的影响(尤其是大气水汽的影响)大大限制了 InSAR 在监测缓慢而微小地表形变方面的应用,因此,在 InSAR 数据处理和干涉影像的解释过程中,必须研究和分析大气的影响并加以处理。

1 大气改正方法综述

1.1 两两比较或线性组合法

1995 年,Massonnet 和 Feigl 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,这种方法要求存在共有 SAR 影像的干涉影像不少于两幅,其缺陷是无法对大气影响进行准确的量化^[7]。如果在共有的 SAR 影像中存在大气异常,将会污染所有相关干涉影像中的形变信号,对这样的两幅干涉影像相加或相减,可大大减弱(如果没有完全消除)大气的影响^[8]。这种方法通常也被称为线性组合法,其缺点是:①具有共有 SAR 影像的干涉影像不一定可以得到;②为了提取形变信息,必须假设形变速率在 SAR 卫星影像获取的时间段内为常数。

1.2 层叠(Stacking)法

对 N 个时序独立的干涉影像求平均,可以削弱空间不相关的噪声到 $1/\sqrt{N}$ ^[7,9]。1999 年,Ferretti 等人在考虑基线、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^[2]。2003 年,Emardson 等人利用美国南加州 GPS 网(SCIGN)的 GPS 观测数据求得的天

顶方向大气延迟估计了水汽的时空变化^[10]。其研究表明,如果卫星轨道的重复周期已知(为常数),根据特定的形变速率敏感度,可以计算出所需干涉影像的数量和时间跨度。与线性组合法一样,层叠法同样基于形变速率是常数的假设,对形变速率非线性的地区不适用。其区别是层叠法需要独立的干涉影像。

1.3 基于地气气象数据的大气延迟改正模型法

迄今为止,许多基于地表气象观测数据估计天顶方向湿大气延迟量的模型已经建立。最普遍、最简单的模型往往都是基于温度随高度升高而降低以及总气压与水汽气压之间关系的假设基础之上的^[11]。一些改进的模型考虑了季节、纬度和气候等因素^[12],更复杂的模型采用统计回归分析的方法估计湿度和温度剖面,然后采用数值积分的方法计算折射率^[13]。1998年,Delacourt等人运用Baby提出的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)^[14]。2001年,Bonforte等人利用GPS观测数据求出了天顶方向湿大气延迟,在和由Saastamoinen模型以及地气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^[15]。但这种方法有两个主要的缺陷:①由地表气象观测数据求得的天顶方向湿大气延迟的精度只有2~5 cm^[12];②这些模型只能在一定程度上减弱与地形相关的“分层影响”,而无法削弱任何与地形无关的水汽扰动影响。

1.4 数值大气模型法

2000年,Shimada利用GANAL数值大气模型改正JERS-1干涉影像发现,观测到的地表形变精度从改正前的4.04 cm提高到改正后的2.04 cm^[16]。GANAL是日本气象局的一个大气数值模型,其以6 h的时间分辨率和1.25°(经度和纬度)的空间分辨率提供低层大气温度、气压、风速向量以及大气水汽压的三维结构。欧洲中分辨率天气预报(ECMWF)模型的时间分辨率为12 h,空间分辨率为2.5°,其用来改正JERS-1干涉影像的精度与GANAL相当^[17]。ECMWF模型当前的光谱分辨率为T511,相当于空间分辨率约40 km。由于空间分辨率比较低,区域和全球性的大气数值模型一般难以描述山区的大气水汽分布(其特征分布往往只有几km)。2002年,Wadge等人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^[18]。

1.5 随机滤波法

2002年,Crosetto等人提出了随机滤波法来削弱大气对InSAR干涉影像的影响^[19]。首先通过先验信息确定一个与形变地区相邻的稳定区域;其次,基于自协方差函数,在稳定区域进行定量分析以提取大气信号,再利用协方差函数的相关性估计形变地区的大气影响;最后,从差分相位中减去大气影响的估值,从而达到削弱大气影响的目的。这种方法受三个因素的制约:①只适用于小范围形变;②有无相邻的稳定区域;③被视为稳定区域如果存在形变,将对最后的结果产生一定的影响。

1.6 时序分析技术

最具代表性的InSAR时序分析技术是永久散射点(permanent scatterers/PS)技术,其已成功处理了大批SAR影像,以探测在时间上强相干的像素,并同时估计(或消除)这些强相干点或永久散射点(即PS点)在各幅干涉影像中的大气影响^[20,21]。地形、形变和大气对干涉相位的贡献可以利用它们不同的时空特性来估计,其中,大气影响的贡献(atmospheric phase screen, APS)独立于基线,与时间(大于1 d)不相关,但在每个单独的干涉影像之间表现出很强的空间相关性;大气相位可以在距离和方位角方向上近似为线性倾斜面,也可以采用时空滤波技术进行处理^[20]。前者只能处理小范围区域(小于5 km×5 km),后者较灵活,但更复杂。必须注意的是,PS技术所估计出的APS值其实是大气影响和轨道误差影响的总和^[20]。然而,由于轨道误差影响对应低阶相位多项式,因此,其不改变大气信号的短波(高频)特性。另一种常用的InSAR时序分析方法是短基线子集(small baseline subset, SBAS)DInSAR技术^[22,23],其与PS技术最大的区别是:PS技术首先在时序上进行相位解缠,而SBAS首先在空间上进行相位解缠。InSAR时序分析技术的不足之处在于需要大量的SAR影像(一般至少需要25~30幅)才能获得比较。此外,其结果在很大程度上依赖于形变区域可靠的强相干点的数量和分布。随着越来越多SAR卫星的发射及同类SAR影像的接收,InSAR时序分析技术是一项很有前景的高精度形变监测技术。

1.7 基于GPS数据的大气水汽改正方法

InSAR和GPS集成的概念最早由Bock等人于1997年提出^[24]。1998年,Williams等人利用美国南加州GPS网(SCIGN)做了一个利用

GPS 数据削弱干涉影像大气影响的模拟实验, 结果表明, 大气的影 响遵循幂律模型, 通过消除长波段的影响可以达到削弱大气噪声的目的。因此, 结合一定的空间拟合模型, 利用 GPS 网估算出的对流层延迟(或水汽含量)可削弱 InSAR 干涉影像的大气影响。另一方面, InSAR 观测值大气改正的效果与 GPS 接收机的空间分布相关。但目前的 GPS 网对于 InSAR 的大气改正不是最优的。由 GPS 得到的天顶方向对流层延迟(或水汽含量)是测站至各颗 GPS 卫星方向观测数据的平均值, 其不同于 InSAR 干涉影像中的大气影响。Hanssen 认为, 利用 GPS 数据难以削弱较 GPS 测站距离更小空间尺度的大气影响^[8]。最新的研究成果表明, 利用基于地形的 GPS 扰动模型(GTTM)不仅可以消除长波段的大气水汽影响, 还可以大大削弱与地形相关的短波段水汽的影响^[25-27]。GTTM 改正模型在南加州的应用表明, 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的约 1.0 cm 降低到改正后的约 0.5 cm^[27], 而 ASAR 得出的形变量与 GPS 结果之间的中误差可减少 0.5 cm 左右^[26]。

1.8 基于星载成像光谱(辐射)仪的大气水汽改正方法

星载遥感技术是获取全球高空间分辨率大气水汽分布最有效的途径。美国宇航局分别于 1999 年 12 月 18 日和 2002 年 5 月 4 日发射的 Terra 和 Aqua 卫星上都装载有中尺度分辨率成像光谱辐射仪(MODIS)。MODIS 共有 36 个光谱段, 位于 0.865~1.240 μm 波段的 5 个近红外光谱可以用于水汽遥感, 其近红外水汽数据的地面分辨率为 1 km, 扫描宽度为 2 330 km, 可在 1~2 d 内扫描整个地球。利用 MODIS 水汽数据改正 InSAR 干涉影像大气影响的思想是由李振洪博士首先提出并实现的, 即 GPS/MODIS 集成大气改正方法^[25, 28]。随后, 欧洲空间局(ESA)发射的 ENVISAT 卫星上载有中分辨率成像光谱仪(medium resolution imaging spectrometer, MERIS)和高级合成孔径雷达(advanced synthetic aperture radar, ASAR), MERIS 和 ASAR 数据在白天可以同时获取。MERIS 共有 15 个波段, 其中 2 个近红外光谱可用于水汽遥感, 其空间分辨率有两类: 完整分辨率为 300 m, 简化分辨率为 1 200 m; MERIS 可在 3 d 内覆盖整个地球。与 GPS/MODIS 集成大气改正方法相比较而言, 基于 MERIS 的 ASAR 大气改正模型具有更高的空

间分辨率、零时差等优点^[29, 30]。在南加州的实验表明, 利用 MODIS 或 MERIS 削弱 InSAR 干涉影像的水汽影响后, InSAR 得出的形变量与 GPS 形变量之间的中误差由改正前的约 1.0 cm 降低到约 0.5 cm^[28, 29]。基于星载成像光谱(辐射)仪的大气水汽改正方法最明显的优点是高空分辨率, 其缺陷是只能在白天无云或少云的条件下进行。MODIS 和 MERIS 对云的敏感性限制了这种改正方法的应用范围, 但是对于少云或无云频率很高的地区, 可以很好地应用^[25, 28, 30]。

2 应用实例

美国南加州 GPS 网(SCIGN)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, 而在洛杉矶地区密度最大, SCIGN 测站间距从几 km 到几十 km 不等。另外, 由于这个地区的高程起伏约为 3 000 m, 地形条件很适合研究与地形有关的水汽分布变化及其对 InSAR 观测值的影响。因此, SCIGN 地区被选为测试 GTTM 大气改正方法的实验区域。

利用 JPL/Caltech ROI_PAC 软件(Version 2.3)^[31]处理了两对 ERS-2 SAR 影像, 并采取了两种不同的处理模式: 无大气改正和基于地形的 GPS 扰动模型(GTTM)大气改正。GTTM 大气改正模型有两个主要的假设: 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。其基本原理与数据干涉处理详见文献[27]。

封二彩图 1 显示的是 SCIGN 地区 2000 年秋季的干涉影像(02/09/2000-16/12/2000), 观测时间间隔为 105 d, 空间垂直基线为 -45~-56 m。利用空间分辨率约 30 m 的 SRTM(shuttle radar topography mission)数字高程模型来消除地形变化在干涉影像中的影响。由于 SRTM 数字高程模型的高程误差约为 7 m^[32], 考虑到干涉影像的空间垂直基线最多可导致 0.27 rad 的相位误差, 对形变估计量来说, 可能引起的最大误差仅为 0.12 cm, 因此可以忽略。在图 1(a)中, 黑实体三角形表示 GPS 测站, 黑长方形表示受水汽影响的区域, 黑实体椭圆表示 Long Beach-Santa Ana 盆地的地表隆起; 在图 1(b)中, 白色正方形表示在卫星至地面方向上形变量差值由大气改正前大于 1σ 改正后小于 1σ (即大气改正后吻合度提高)的 GPS 测站, 红色实体圆形表示形变量差值由大气改正前小于 1σ 改正后大于 1σ (即大气改正后

吻合度降低) 的 GPS 测站, 黑实体三角形表示改正前后形变量差值都大于或都小于 1σ (即大气改正前后吻合度没有多大变化) 的 GPS 测站。图 1 中必须注意的是: ① 相位已经经过解缠, 并转换成以 mm 为单位的表面至卫星方向上的距离变化。距离变化若为正值, 表示地球表面远离卫星, 即地表下沉(假设没有大气影响和其他误差); 负值则表示地表上升(在卫星至地表方向上); ② 在干涉影像覆盖范围内, 灰色表示由于植被或陡坡引起的弱相干性区域。

由于地下水水位的变化和石油的开采, 洛杉矶地区存在着较大的季节性水平方向和垂直方向的形变^[33]。图 1(a) 和 1(b) 都显示了在 2000 年秋季 Long Beach Santa Ana 盆地(见黑色椭圆形) 经历了约 35 mm 的地表隆起(在地面至卫星的方向上), 这个结果与 GPS/MODIS 集成大气改正后的结果相吻合^[28]。洛杉矶地区秋季的地表隆起主要是因为秋季用水量的减少和人工补给地下水导致地下水位的上升引起的^[33]。

比较图 1(a) 和 1(b) 可以明显地看出, GTTM 大气改正模型可以大幅度地削弱大气影响(如黑实体长方形表示的区域)。解缠后, 干涉相位变化改正前为 2.48 rad(图 1(a)), 而经 GTTM 改正后为 1.34 rad(图 1(b)), 这表明采用 GTTM 大气改正方法后, 干涉相位变得更加平滑, 亦即噪声(主要为大气影响)减少。

为了进一步验证 GTTM 大气改正的结果, 将 GPS 得到的独立三维形变量投影到卫星至地面方向后与 InSAR 形变量进行了比较。在图 1(b) 中共有 77 个 GPS 测站, 其中白色正方形有 32 个(占 41.6%), 而红色实体圆形只有 1 个(占 1.3%)。大气改正前, 在卫星至地面方向上, GPS 形变量和 InSAR 形变量的差值中误差为 1.1 cm, 经 GTTM 改正后下降到 0.6 cm。

封二彩图 2 显示的是 SCIGN 地区 2000 年夏季的干涉影像(20/05/2000-02/09/2000), 观测时间间隔为 105 d, 空间垂直基线为 13~37 m, SRTM 数字高程模型误差可导致的形变估计量最大误差仅为 0.08 cm, 可忽略不计。在图 2(a) 中, 黑实体三角形表示 GPS 测站, 黑实体椭圆表示 Long Beach Santa Ana 盆地的地表下沉; 图 2(b) 中符号的意义同图 1(b)。图 2(b) 中共 76 个 GPS 测站, 其中 28 个白色正方形(占 36.8%), 5 个红色实体圆形(占 6.6%)。大气改正前, GPS 和 InSAR 在卫星至地面方向上距离变化差值的中误差为 1.0 cm, 经 GTTM 改正后下降到 0.8

cm。与图 1 相比, 图 2 中水汽影响的削弱幅度有所减小(尽管 GPS 测站数相当), 这主要是因为大气水汽的空间分布情况可直接影响到仅仅基于 GPS 数据的 GTTM 模型^[27]。

图 2 显示, 在 2000 年夏季, Long Beach Santa Ana 盆地(见黑色椭圆形) 出现了约 35 mm 的地表下沉(在地面至卫星的方向上), 这个结果与 GPS/MODIS 集成大气改正后的结果一致^[28]。该地区夏季地表的大幅度下沉主要是由于居民和工业用水量大幅度增加所致^[33]。

3 结 语

随着 InSAR 技术研究的深入以及应用的推广, InSAR 观测值的大气影响日益受到重视。当前, 国际上 InSAR 观测值大气改正的研究主要集中在以下两个方面: ① 利用时序分析的方法减弱大气影响(如 PS 和 SBAS InSAR 技术)。时序分析方法需要大量的 SAR 卫星影像, 数据处理难度较大, 但可提供高精度、强相干点的时序形变量, 其大气模型的改进有望进一步提高其监测地表形变的精度, 更有利于干涉影像的物理解释。② 利用独立观测值(如 GPS、MODIS 和 MERIS) 削弱大气影响。水汽含量估值的精度、空间分辨率和时间分辨率都是重要的影响因素。此外, 合理的空间拟合方法和应用方式也是决定大气改正能否成功的重要因素^[27, 28]。

值得一提的是, 通过比较不同大气改正方法(如 GTTM 和 GPS/MODIS) 改正的干涉影像, 有助于识别水汽数据所引起的误差, 从而成功地提取出真正的形变信息, 并进行合理的物理解释。如在 GPS/MODIS 大气改正后的干涉图像中发现的附加信号(即文献[29] 中图 4 和图 5 白色虚线椭圆形), 在原始的(即没有大气改正的)干涉影像和经 GTTM 改正的干涉影像中都没有, 由此可以很容易地断定它们是由 MODIS 的水汽误差引起的, 且极可能是云引起的。

参 考 文 献

- [1] Zebker H A, Goldstein R M. Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations[J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91 (B5): 4 993 4 999
- [2] 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

- [3] Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping Small Elevation Changes Over Large Areas: Differential Radar Interferometry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94 (B7): 9 183-9 191
- [4] 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
- [5] Goldstein R M. Atmospheric Limitations of Repeat track Radar Interferometry [J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22 (18): 2 517-2 520
- [6] 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): 7 547-7 563
- [7] Massonnet D, Feigl K L. Discrimination of Geophysical Phenomena in Satellite Radar Interferograms[J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22 (12): 1 537-1 540
- [8] Hanssen R F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis[C]. Kluwer Academic, Dordrecht, Boston, 2001
- [9] 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): 27 051-27 068
- [10] 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): 2 231
- [11] Saastamoinen J. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites[C]. *Geophysics Monograph 15*, the 3rd Int. Symp. Use of Artificial Satellites for Geodesy, AGU, Washington D C, 1972
- [12] Baby H, Gole P, Lavergnat J A. Model for Tropospheric Excess Path Length of Radio Waves from Surface Meteorological Measurements [J]. *Radio Science*, 1988, 22: 1 023-1 038
- [13] Askne J, Nordius H. Estimation of Tropospheric Delay for Microwaves from Surface Weather Data [J]. *Radio Science*, 1987, 22: 379-386
- [14] Delacourt C, Briole P, Achache J. Tropospheric Corrections of SAR Interferograms with Strong Topography[J]. Application to Etna, *Geophysical Research Letters*, 1998, 25 (15): 2 849-2 852
- [15] 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: 1 343-1 357
- [16] 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): 2 236-2 238
- [17] 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): 2 052-2 054
- [18] 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
- [19] 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
- [20] 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): 2 202-2 212
- [21] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39 (1): 8-20
- [22] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms [J]. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40: 2 375-2 383
- [23] Lanari R, Lundgren P, Manzo M, et al. Satellite Radar Interferometry Time Series Analysis of Surface Deformation for Los Angeles, California[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31 (23): 613
- [24] Bock Y, Williams S D P. Integrated Satellite Interferometry in Southern California[J]. *Eos Trans. AGU*, 1997, 78 (29): 299-300
- [25] Li Zhenhong. Correction of Atmospheric Water Vapour Effects on Repeat pass SAR Interferometry Using GPS, MODIS and MERIS Data[D]. London: University College London, 2005
- [26] 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
- [27] Li Zhenhong, 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
- [28] Li Zhenhong, 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
- [29] Li Zhenhong, 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
- [30] Li Zhenhong, 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
- [31] Rosen P A, Hensley S, Peltzer G, et al. Updated Repeat Orbit Interferometry Package Released[J]. EOS, TRANSACTIONS, American Geophysical Union, 2004, 85 (5): 47
- [32] Farr T G, Kobrick M. Shuttle Radar Topography Mission Produces a Wealth of Data[J]. EOS Transactions of the American Geophysical Union, 2000, 81: 583-585
- [33] Bawden G W, Thatcher W, Stein R S, et al. Tectonic Contraction Across Los Angeles after Removal of Groundwater Pumping Effects [J]. Nature, 2001, 412 (23): 812-815

第一作者简介: 吴云孙, 博士生, 工程师。现主要从事卫星测高、InSAR 与 GPS 研究。

E-mail: wuyunsun@163.com

Atmospheric Correction Models for InSAR Measurements

WU Yunsun¹ LI Zhenhong² LIU Jingnan³ XU Caijun¹

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

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

(3 Presidential Secretariat, Wuhan University, Luojia Hill, Wuhan 430072, China)

Abstract: A brief review of InSAR atmospheric correction approaches, which have been developed to reduce atmospheric effects (particularly water vapour effects) from SAR interferograms in the last decade, is given. Emphasis is given to GPS topography-dependent turbulence model (GTMM) developed at University College London. Examples over the Los Angeles region reveals that, without InSAR atmospheric correction, the RMS differences between GPS-derived and InSAR-derived range changes in the line of sight (LOS) direction were 1.0 cm. After applying the GTMM, the RMS differences decreased to 0.5 cm, suggesting that the GTMM successfully reduced atmospheric water vapour effects on interferograms. A comparison between the GTMM and the GPS/MODIS integrated water vapour correction model shows that the GTMM and GPS/MODIS integrated models are complementary when correcting InSAR measurements.

Key words: InSAR; MODIS; water vapour; surface deformation; atmospheric correction

About the first author: WU Yunsun, Ph. D candidate, engineer. His main research interests include satellite altimetry, InSAR and GPS. E-mail: wuyunsun@163.com