

## InSAR 大气误差改正中的空间插值研究

徐佳<sup>①</sup> 关泽群<sup>①</sup> 何秀凤<sup>②</sup> 王江林<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(武汉大学遥感信息工程学院 武汉 430079)

<sup>②</sup>(河海大学卫星及空间应用研究所 南京 210098)

<sup>③</sup>(广州南方测绘仪器有限公司 广州 510665)

**摘要:** 该文针对利用辅助数据进行 InSAR 大气误差改正时存在的空间插值问题进行了详细探讨, 分别利用模拟数据和 GPS 观测数据进行了实验。实验结果表明, 相较于函数方法和统计方法, 反距离加权法与 Kriging 方法是更适用的插值方法, 而它们的插值效果会受到辅助数据的类型、精度及分布的影响, 当辅助数据质量较高且呈规则分布时效果最好。另外, 若在空间插值过程中考虑高程的影响, 能明显提高插值精度, 从而改善大气误差改正效果。

**关键词:** 干涉 SAR; 大气误差改正; 空间插值; 对流层延迟

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-0911-05

## Spatial Interpolation Methods for Correcting Atmospheric Effects Using Interferometric SAR

Xu Jia<sup>①</sup> Guan Ze-qun<sup>①</sup> He Xiu-feng<sup>②</sup> Wang Jiang-lin<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

<sup>②</sup>(Institute of Satellite Navigation & Spatial Information System, Hohai University, Nanjing 210098, China)

<sup>③</sup>(Guangzhou South Surveying and Mapping Instrument Company, Guangzhou 510665, China)

**Abstract:** In this paper, the focusing has been on spatial interpolation in correcting atmospheric effects using Interferometric SAR based on external data. Several factors have been discussed separately by using both simulated data and GPS data. The results indicate that the inverse distance weighted and kriging interpolation methods are more suitable than the function method and statistical method. And the validity of calibration is influenced by the type and quality of external data. When the external data is precise and regular, the result will be the best. Moreover, the improved interpolation methods by incorporating terrain elevation information have proved to be better.

**Key words:** Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR); Atmospheric effects correction; Spatial interpolation; Tropospheric delay

### 1 引言

近年来, InSAR 技术以其高精度、低成本、连续性等特点在很多领域表现出极好的应用前景。然而, 随着研究的不断深入, 可以看到尽管其精度已有较大提高, 在实际应用中仍受到一些因素的制约从而限制了该方法的应用。大气影响就是不容忽视的误差源之一, 特别是对于沿海地区, 由于相对温度变化无常, 极端条件下, 大气延迟可导致数十米的高程误差和数厘米的形变误差<sup>[1]</sup>。国内外不少学者相继对重复轨道雷达干涉测量中的大气延迟进行了分析与研究, Hanssen(1998)等人<sup>[2]</sup>利用 26 景 ERS tandem 影像生成的干涉纹图进行了大气效应贡献值的定量分析, 并推导出描述 InSAR 中大气延迟的经验模型; 中国地震局的游新兆等人<sup>[3]</sup>

进行了大气折射对 InSAR 影响的定量分析, 模拟了大气参数变化对干涉相位、高程与形变误差的影响量; 大气效应对干涉相位、高程与形变误差均造成了影响, 如何有效改正 InSAR 中的大气误差成为进一步提高干涉测量精度的关键。

目前, 系统解决 InSAR 大气影响的成熟方案尚未出现, 为了减少大气效应对 InSAR 的影响, 可以采用以下几种方法: (1)选择具有较好大气条件的 SAR 影像对; (2)相位累积法(Stacking); (3)利用外部辅助数据进行校正; (4)永久散射体(Permanent Scatterers, PS)技术。第 1 种方法对于影像数据要求较高, 往往仅在低温干燥的地区且对 InSAR 精度要求不是太高时采用。相位累积法和 PS 技术均利用 SAR 影像(干涉纹图)本身, 根据大气延迟的统计特性来将之消除或减少, 该方法往往需要同一地区的多景影像, 特别是 PS 技术一般要求大于 20 景, 这样会造成影像的浪费。与其它方法相比, 第 3 种方法更为经济适用, 因而, 有不少学者采用此方法来降低大气影响。通常采用的辅助数据有气象站数据

2006-10-30 收到, 2007-10-08 改回

国家自然科学基金(50579013), 教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0438)资助课题

据、无线探空数据、GPS数据、MODIS数据、MERIS数据等等,由于这些数据的分辨率目前还都无法与SAR影像相当,因此,在校正过程中往往需要对这些辅助数据进行空间插值,大气误差改正效果很大程度上取决于空间插值的效果。本文即对InSAR大气误差改正(校准法)中的空间插值问题进行详细探讨,分别利用模拟数据和GPS数据进行实验,对影响校准法有效性的因素进行定量分析,得出了有价值的结论。

## 2 空间插值理论

空间插值是指通过已知的数据点或已知的相对小一些的区域内的数据点,计算出相关的其他未知点或相关区域内所有点的方法。在利用校准法进行InSAR大气误差改正过程中,进行空间插值的主要目的在于提高数据密度和数据格网化。现有的空间插值方法有很多,常用的大致分为以下几类:(1)几何方法。这是最简单的空间内插方法,其算法的一般形式为 $Z = \sum_i \omega_i Z_i$ ,  $\sum_i \omega_i = 1$ ,其中已知样本点( $Z_i$ )对插值估计点( $Z$ )的作用表现为不同的加权( $\omega_i$ ),加权系数不同,插值算法也各不相同。具有代表性的有最近距离法、反距离加权法(Inverse Distance Weighted, IDW)等等;(2)函数方法。不直接考虑距离与方向上的空间相关性,而使用函数来逼近曲面的一种方法,它不需要对空间结构进行预先估计,也不需要做统计假设。常用的函数方法有傅里叶级数、样条函数、双线性内插等<sup>[4]</sup>;(3)统计方法。其基本假设是一系列空间数据相互相关,预测值的趋势和周期是与它相关的其它变量的函数。此方法一定要有好的采样设计,如果采样过程不能反映出表面变化的重要因素,则内插一定不能取得好的效果。常用的统计方法有趋势面法和多元回归分析;(4)空间统计(又称地质统计学)方法。其基本思想是假定空间随机变量具有二阶平稳性,或者是服从空间统计的本征假设,即距离较近的采样点比距离远的采样点更相似,相似的程度通过对点的平均方差来度量,点对差异的方差大小只与采样点间的距离有关,而与它们的绝对位置无关。以Kriging方法及其各种变种为代表<sup>[5]</sup>;(5)随机模拟方法。该方法是地质统计学方法的另一个方向,其定义了各种随机变量之间的空间相关性,可以根据相邻数据把高不确定性的先验分布更新为低不确定性的后验分布。常用的随机模拟方法有高斯过程、马尔科夫过程、人工神经网络方法等<sup>[6]</sup>。

影响空间插值精度的因素有很多,如站点数据的空间采样特性、站点样本容量、数据空间分布、插值方法等等,本文将通过实验对之进行探讨。

## 3 实验与分析

Janssen等人(2004)在文献[7]中对基于GPS数据的InSAR大气误差改正进行了探讨,提出了适用于DInSAR(差分干涉测量)的双差校正算法,并利用美国南加利福尼亚综合GPS网(SCIGN)数据通过交叉检验法对几种不同的空间插

值方法进行了比较分析。由于已知样本点数据很少且在一幅SAR影像中的分布不平均,仅仅以此来探讨InSAR大气误差改正中的空间插值问题并非最佳,也不全面。本文将分别利用模拟数据和GPS数据对InSAR大气误差改正(校准法)中的空间插值问题进行全面探讨,分析影响校准法有效性的因素。

### 3.1 模拟数据

InSAR中的大气延迟改正往往是针对对流层而言的,对流层延迟一般可分为静力延迟(hydrostatic delay)和湿延迟(wet delay),前者可以用地面气象资料估计得到,精度可优于1mm,而后者则难以用模型精确估计,也正是影响大气误差改正效果的关键<sup>[2]</sup>。本实验即根据大气延迟的统计规律,结合Kolmogorov湍流理论利用随机行走过程进行模拟得到湿延迟<sup>[8]</sup>(以60m空间分辨率模拟6km×6km范围内的湿延迟图,其中未改正时大气湿延迟的标准偏差为8.03cm,即在95%置信度下可能引入-0.16m~0.16m的误差)。为了探讨影响改正效果的因素,从模拟数据中随机抽取一定数量的采样点作为已知点,然后利用这些已知点进行空间插值得到与模拟延迟图具有相同分辨率的大气延迟图,根据两者之间残差的标准偏差(SD)来检验改正效果。本文利用Matlab语言编程实现了多组实验:(1)分别采用不同类型的插值方法进行插值;(2)以5为步长从模拟数据中随机抽取5到70个采样点作为已知点,分别进行插值得到用于改正的大气湿延迟量;(3)对随机采样点分别增加误差为3cm与6cm的正态随机误差,然后分别进行插值得到用于改正的大气湿延迟量;(4)分别抽取随机散乱分布和规则格网分布的采样点作为已知点,进行插值得到用于改正的大气湿延迟。

除了反距离加权法和Kriging插值方法以外,还利用线性插值法、双三次插值法、样条插值法和多元回归分析法进行了实验。然而由于采样点分布随机且不密集,利用这4种方法插值以后进行改正,得到的残差的标准偏差至少为13cm,有些甚至无法得到插值结果。此处不列其具体结果,仅对改正效果较好的反距离加权法(IDW)和Kriging插值方法(KRG)进行进一步的比较分析。从图1可以看出,在已知点无误差时采用KRG方法的改正效果明显优于IDW方法;当已知点误差较小(如3cm)时,KRG方法的改正效果基本优于IDW方法,但当已知采样点数目较多时KRG方法的优越性并不明显;当已知点误差较大(如6cm)时,若采样点数目大于15,IDW方法的改正效果反而要优于KRG方法。图2显示了采样点精度、数量与分布不同对大气误差改正效果的影响。从图2(a)、图2(b)可以看出,无论是IDW插值还是KRG插值,一般来说采样点越多改正效果越好,采样点精度越高改正效果越好。特别是对于KRG插值,采样点的精度对改正效果影响更为明显。然而已知采样点增多也不一定改善改正效果,从图中可看出,当点数大于40时,随着点数增多大气误差改正效果并不明显,特别是当采样点

精度较差时残差的标准偏差出现了较大波动。因此,增加已知采样点数就能增强改正效果的说法是比较片面的,因为改正效果不仅与点数有关,还与采样点的精度和空间分布有关。图2(c)显示了采样点的分布对大气误差改正效果的影响,对于两种插值算法来说,采样点呈规则格网分布均比散乱分布插值效果要好。

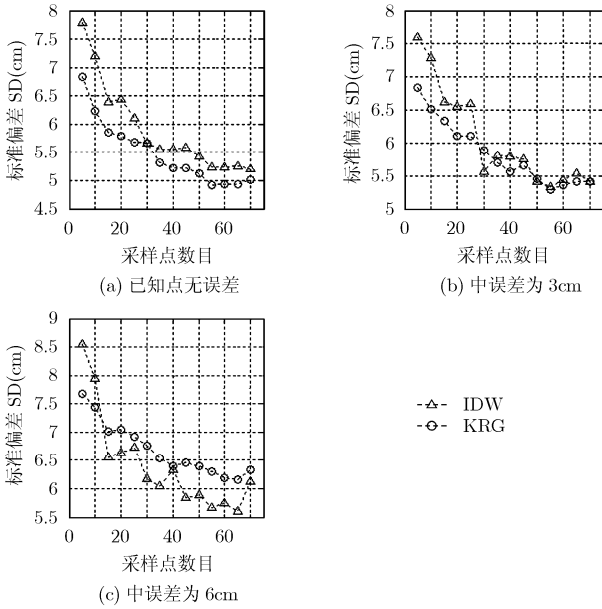


图 1 不同插值算法对大气误差改正效果的影响 (在采样点数目、精度不同的情况下)

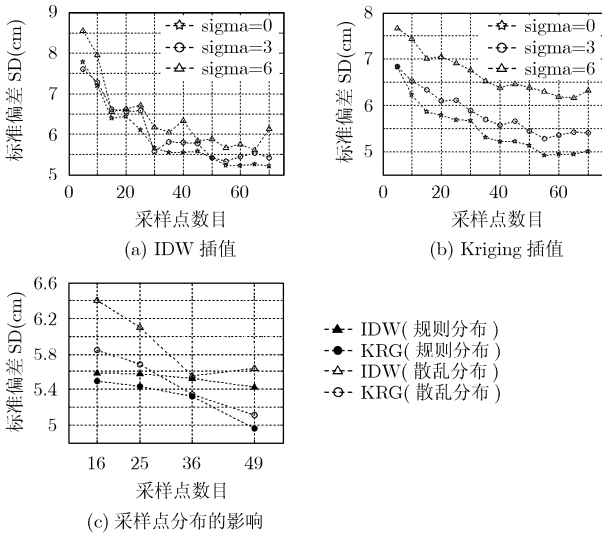


图 2 采样点的精度、数量与分布对大气误差改正效果的影响

3.2 GPS 观测数据

在实际情况下,如果采用 GPS 观测数据作为辅助数据进行大气改正,我们获取的往往为天顶对流层大气延迟(ZTD),而这部分大气延迟与高程是相关的,在进行空间插值的过程中除顾及平面位置的影响外,是否有必要考虑高程

因子的影响值得探讨,因此本文以南加利福尼亚综合 GPS 网的一部分为试验网进行了实验。实验区由 26 个站点组成(分布见图 3,进行了编号),覆盖面积约为 60km×60km。本次实验采用 2005 年 doy=100 的观测数据,利用 GAMIT 软件进行解算得到 0 时 0 分的对流层延迟量(见图 4,同时绘制各站点高程分布图)。从图 4 可以看出,高程越高时对流层延迟量越小;反之,高程越低时对流层延迟量越大。因此,在进行空间插值时,可以考虑引入高程因子对插值算法进行改进。

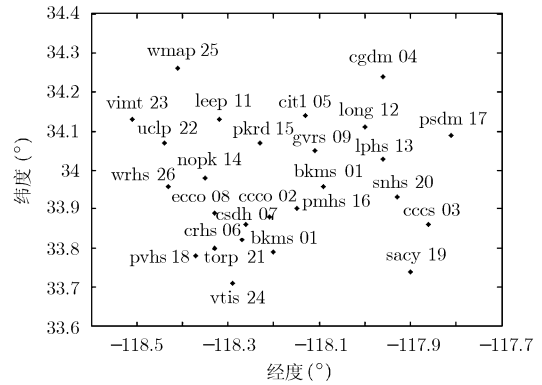


图 3 实验区站点分布图及编号

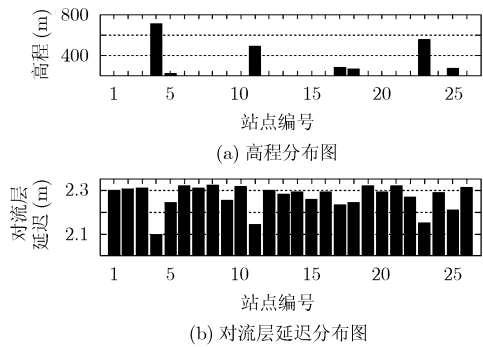


图 4 高程及对流层延迟量分布

本实验中,对于 IDW 插值,依照式(1)构造与空间位置和高程同时有关的权值,得到改进的反距离加权插值算法(IIDW)。

$$\begin{aligned} \varpi_i &= \alpha \varpi_i^s + (1 - \alpha) \varpi_i^h \\ &= \alpha \times \frac{1/(d_i^s)^2}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(d_i^s)^2}} + (1 - \alpha) \times \frac{1/(d_i^h)^2}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(d_i^h)^2}}, \quad i=1,2,\dots,n \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $\sum_{i=1}^n \varpi_i = 1$ ,  $\alpha$  为影响因子,  $0 \leq \alpha \leq 1$ ,  $d_i^s$  为已知样本点  $i$  到待插值点的水平距离,  $d_i^h$  为已知样本点  $i$  与待插值点的高程差。对于 KRG 插值,依照式(2)构造半变异函数模型,得到改进的 Kriging 插值算法(IKRG)。

$$\gamma = C \times d^\alpha + k \times \Delta H \quad (2)$$

其中  $\gamma$  为半变异函数值,  $d$  和  $\Delta H$  分别为水平距离和高差,  $C$ 、 $\alpha$  和  $k$  为模型参数。

利用 Matlab 编程实现并采用交叉验证比较插值效果,即每次抽取 1 个测站作为待插值点,其余测站作为已知样本点,插值估计值与由 GAMIT 软件推算的对流层延迟值(视作真值)进行比较,结果如图 5 所示。显然,引入高程因子进行改进后得到的估算值大多数更接近于真值,特别是在 4, 11, 17, 18, 23, 25 这几个高程较高的测站,引入高程进行改进后插值效果得到了明显改善。进一步对插值得到的估算值与真值之间的误差进行统计(结果见表 1),可以看出引入高程进行改进后,误差的平均值和标准差均减小;此外,引入高程因子的 IIDW 插值法插值效果优于不考虑高程的 KRG 插值法。

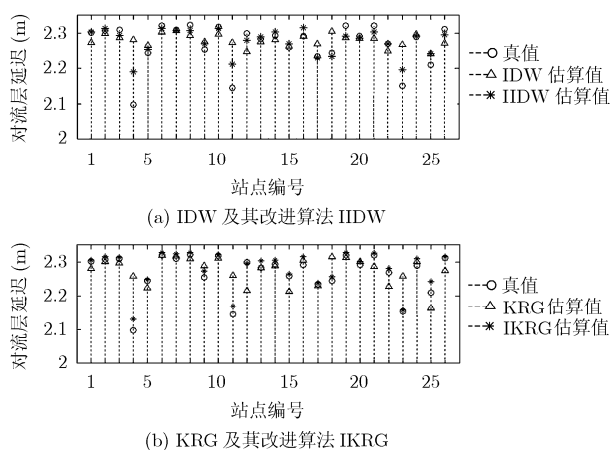


图 5 引入高程因子前后插值效果比较

表 1 大气延迟估计误差统计表(cm)

| 插值方法        | 最大值   | 最小值  | 平均值  | 标准差  |
|-------------|-------|------|------|------|
| IDW<br>插值法  | 18.32 | 0.61 | 3.64 | 4.29 |
| IIDW<br>插值法 | 9.31  | 0.93 | 1.81 | 2.14 |
| KRG<br>插值法  | 16.16 | 0.14 | 3.52 | 4.11 |
| IKRG<br>插值法 | 3.32  | 0.32 | 1.18 | 0.92 |

#### 4 结束语

利用辅助数据进行 InSAR 大气误差改正时,存在的最大问题是辅助数据的分辨率无法与 SAR 影像分辨率相当,因此,在校正过程中必须进行空间插值,而空间插值结果的好坏将直接影响大气误差改正的效果。本文通过实验对其进行了探讨,与实际相结合,可以得出以下结论:(1)一般来说,站点密度越高、采样点精度越高改正效果越好,然而当采样

点数目过多时,不仅带来计算上的麻烦,而且对改正效果也未必有很大帮助。但实际应用中辅助数据的分辨率远不够,特别是利用 GPS 数据进行改正时,还是应尽量选用影像覆盖区内更多的站点数据;(2)通常情况下,规则分布更有利于改正大气误差,因而如果能获取高质量的 MODIS 或 MERIS 数据,比 GPS 数据更能得到好的效果;(3)由于辅助数据的分辨率通常较低,特别是利用 GPS 数据进行 InSAR 大气误差改正时站点分布较稀疏,因而不宜采用函数方法(如线性插值法、双三次插值法、样条插值法等)和统计方法(如趋势面法和多元回归分析);(4)反距离加权法(IDW)和以 Kriging 为代表的空间统计方法均适用于 InSAR 大气误差改正,由于高质量的 GPS、MODIS、MERIS 水汽产品的精度一般较高,因而通常使用 Kriging 为代表的空间统计方法更佳。不过由于 IDW 方法计算简单,当获得的辅助数据质量较差时,使用 IDW 对大气误差进行大致估算更为方便;(5)由于对流层大气延迟与高程是相关的,在进行空间插值的过程中除顾及平面位置的影响外,还有必要考虑高程因子的影响。

由于篇幅有限,本文仅采用了最简单的 Kriging 方法以说明空间统计方法适用于 InSAR 大气误差改正,在实际应用中,还应对其它空间统计方法以及随机模拟方法进行研究。此外,在引入高程因子进行改进时,式(1)中的影响因子  $\alpha$  以及式(2)中模型参数,均为经反复实验确定。如何更好地引入高程因子、如何确定模型中的参数都值得深入探讨,我们将在以后的工作中进一步研究。

#### 参考文献

- [1] 刘国祥. InSAR 应用实例及其局限性分析[J]. 四川测绘, 2005, 28(3): 139-143.  
Liu GX. Application examples of InSAR and its limitation analysis [J]. *Surveying and Mapping of Sichuan*, 2005, 28(3): 139-143.
- [2] Hanssen R F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Press, 2001: 199-204.
- [3] 游新兆, 王琪, 乔学军, 等. 大气折射对 InSAR 影响的定量分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(2): 81-87.  
You X Z, Wang Q, and Qiao X J, et al. Quantitative estimation of effect of atmospheric refraction on InSAR [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2003, 23(2): 81-87.
- [4] 易大义, 沈云宝, 李有法. 计算方法[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002, 第二章.  
Yi D Y, Shen Y B, and Li Y F. Computing Method[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2002, Chapter2.
- [5] 郭伦, 刘瑜, 张晶, 等. 地理信息系统——原理、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 178-191.  
Wu L, Liu Y, and Zhang J, et al. Principles, Methods and Applications of Geographic Information System[M]. Beijing: Science Press, 2001: 178-191.

- [6] Fotheringham A S, Charlton M, and Brunston C. The geography of parameter space: An investigation of spatial non-stationarity[J]. *International Journal of Geographic Information Systems*, 1996, 10(5): 605-627.
- [7] Janssen V, Ge L, and Rizos C. Tropospheric corrections to SAR interferometry from GPS observations[J]. *GPS Solution*, 2004, 8(3): 140-151.
- [8] Williams S, Bock Y, and Fang P. Integrated satellite interferometry: Tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar product[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B11): 27051-27068.
- 徐 佳: 女, 1983 年生, 博士生, 从事遥感信息处理与应用方面研究.
- 关泽群: 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理、遥感图像解译、3S 集成技术与应用等方面研究.
- 何秀凤: 女, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为卫星测量与应用、形变监测、3S 集成技术与应用等方面研究.
- 王江林: 男, 1981 年生, 研究生, 从事 GPS 数据处理软件的开发与应用方面研究.