

文章编号: 1001-1595(2006)02-0118-04

中图分类号: P228.41

文献标识码: A

虚拟参考站技术中对流层误差建模方法研究

熊永良^{1,2}, 黄 毅¹, 晓利², 殷海涛¹

(1. 西南交通大学 测量工程系, 四川 成都 610031; 2. 香港理工大学 土地测量与地理资讯学系, 香港 九龙)

Research on the Modeling of Tropospheric Delay in Virtual Reference Station

XIONG Yong-liang^{1,2}, HUANG Ding-fa¹, DING Xiao-li², YIN Hai-tao¹

(1 Dept of Surveying Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031, China; 2 Dept of Land Surveying & Geo-informatics, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract Atmospheric delay, including ionospheric delay and tropospheric delay, is one of the main error sources in the long distance kinematic positioning. Many authors have made great researches on this problem. Atmospheric delay can be modeled by a simulated model, such as Hopfield's model and Saastamoinen's model. Neutral atmosphere delay has badly affected precise positioning. Virtual reference station technology is an effective method to reduce the impact of atmospheric error on precise positioning. The location of VRS (usually using the navigation position) can be arbitrarily selected by user. Existing RTK processing software can be applied to long distance RTK if using VRS technology. The key problem in VRS is to model atmospheric delay precisely. For modeling the ionospheric delay, many authors have done great works based on double frequency observables on multi-reference stations^[1,2]. Because of the complexity of tropospheric error, the accuracy of existing tropospheric delay models can not meet the requirement of precise positioning.

After investigating the relationship between tropospheric delays and the elevations of reference stations, this paper presented seven troposphere-fitting models with height factors, and then analyzed the accuracies of proposed fitting models by two experiments. Research results show that the proposed models have better fitting accuracy than traditional method according to the data from part of SCIGN network. The best fitting model is determined by check points. The fitting accuracy depends on the number of known points and their distribution as well as the size of a network.

Based on the test on part of SCIGN network with an area of 60 km × 60 km, the height of which is from -20 m to 700 m, polynomial fitting model with 4 parameters including one height parameter has the best fitting accuracy (± 7.6 mm) if using 5 known points. For an area of 500 km × 300 km, polynomial fitting model with 5 parameter including one height parameter is the best one if using 6 points, the accuracy of which is about ± 1.8 cm.

For real time application, an extrapolating method was proposed by this paper. Initial test showed that the extrapolating accuracy is about ± 9.0 mm. Further experiments need to be done in order to test the accuracy of proposed models in different networks with bigger average height difference than the test network from SCIGN.

Key words: GPS; Virtual Reference Station(VRS); troposphere; fitting model

摘 要: 大气折射误差和轨道误差是制约长距离 RTK 精度的主要因素。虚拟参考站技术利用多个基准站的观测数据来建立大气延迟误差和轨道误差模型,以削弱这些误差的影响。在分析测站高程对对流层延迟建模精度影响的基础上,提出 7 种含高程影响因子的对流层误差建模模型,并通过两个实例,分析比较这几种对流层建模模型的精度和适用条件。最后,分析和讨论建议模型用于实时动态定位的精度,得出一些有益的结论。

关键词: GPS; 虚拟参考站; 对流层误差; 长距离 RTK

收稿日期: 2004-11-05; 修回日期: 2006-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(40271091)和香港基金项目(ASD1, 34, 37, A222)

作者简介: 熊永良(1964-),男,四川人,教授,从事 GPS 基线解算理论和算法研究。Email: ylxiong@sina.com

1 前 言

大气折射误差是影响长距离实时动态定位 (RTK) 的主要误差来源。虚拟参考站技术 (Virtual Reference Station, VRS), 是一种削弱长距离动态定位中大气误差影响的有效方法^[1,2]。对流层对 GPS 信号的影响是复杂多变的, 其影响取决于气象参数, 测站的经纬度和高程以及季节性变化等因素, 虽然许多学者对其进行了研究, 并提出了许多对流层误差的改正模型^[3] (以 Hopfield 模型和 Saanstanmoinen 模型最为典型), 但就其精度而言还不能满足高精度动态定位的要求。

虚拟参考站技术利用多个基准站的观测数据来建模大气延迟误差, 并根据用户需要建立虚拟参考站。虚拟参考站上的虚拟相位观测量可用如下方程重建:

$$\lambda\varphi = \rho + c(\hat{\varphi}_r - \hat{\varphi}^s) - dI + dT + \lambda N + \hat{\varphi}_m + \hat{\varphi} \quad (1)$$

式中, φ 为虚拟相位观测量, ρ 为卫星到接收机的几何距离, 可按广播星历和流动站的导航解求出, $\hat{\varphi}^s$ 为卫星钟差, 可根据参考站观测数据计算, $\hat{\varphi}_r$ 为接收机钟差, dI 为电离层延迟, 可根据基准站上的双频观测量来建模, dT 为对流层延迟, 可根据基准网的观测量联合解算出基准站的对流层延迟, 然后建立区域对流层延迟模型, N 为虚拟整周模糊度, 设为未知数, $\hat{\varphi}_m$ 为虚拟参考站多路径误差, 可根据流动站的观测环境考虑, $\hat{\varphi}$ 为虚拟参考站天线相位中心偏差, 可根据流动站的天线类型确定。流动站到虚拟参考站的基线可按短基线算法解算。因此, 利用 VRS 技术, 常规 RTK 用户按标准 RTK 作业模式可实现长距离 RTK 定位, 这是 VRS 的突出优点。

本文通过多基站的观测量联合解算基准站的对流层延迟, 然后建立区域对流层误差模型。通过分析测站高程对对流层建模精度的影响规律, 提出了 7 种含高程影响因子的对流层拟合模型, 并通过两个试验网的实际数据分析, 比较了这几种模型的精度。对该模型在实时动态定位中的应用可能进行了分析和讨论。

2 基于多基站 GPS 观测量的区域对流层误差建模方法

2.1 本文采用的试验网及对流层参数解算简介

Integrated GPS Net) 的一部分, 由 28 个点组成, 覆盖面积约 60 km × 60 km, 其网形图见图 1, 图中带“*”的点为已知点。本次分析所用数据来自 2002 年 doy (年积日) = 350, 该测区属于小山区, 各点高程分布图见图 2。选择外围的 5 个点作为分析时的已知点 (WMAP, PSDM, SACY, VTIS, UCLP 为已知点), 其余为检核点。

GAMIT 软件是世界上公认的最优秀 GPS 解算软件之一, 其估算对流层参数的精度好于 ±1 cm, 因此本文采用 GAMIT 软件解算对流层参数。本次试验的对流层参数个数选择为 25 个 (即 1 小时设一个对流层参数)。GAMIT 软件在进行对流层延迟估计时, 按时段设置对流层未知数, 在一个测站上的每个时段的干延迟和湿延迟合并为一个未知数。

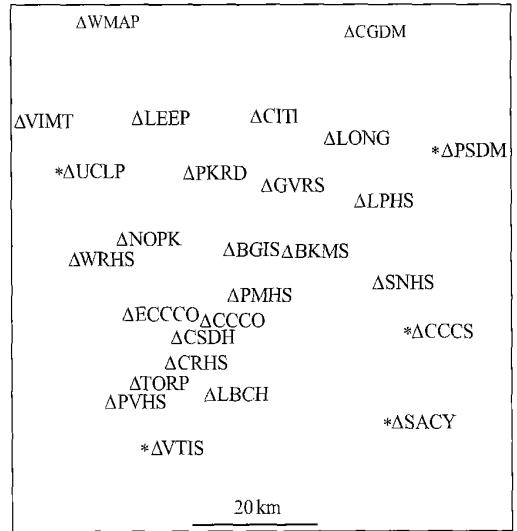


图 1 基准站分布图

Fig. 1 Distribution for reference stations

2.2 含高程影响因子的对流层延迟拟合模型

各站在 2002 年第 350 天 0 时 0 分的对流层延迟量和测站高程分布图见图 2。由图 2 可见对流层延迟与测站高程之间是相关的, 即高程大的测站对流层延迟量小, 而高程小的测站对流层延迟量大, 其原因是在高程小的地区的对流层厚度比高程大的地区的对流层厚度大。本文按参数的数目、类型和参数的组合模式不同, 提出 7 种含高程影响因子的对流层拟合模型, 一并列于表 1。表 1 中 x, y 和 h 是测站的 WGS84 椭球坐标对应的高斯投影坐标, 高斯投影计算时的中央子午线经度为测区平均经度。

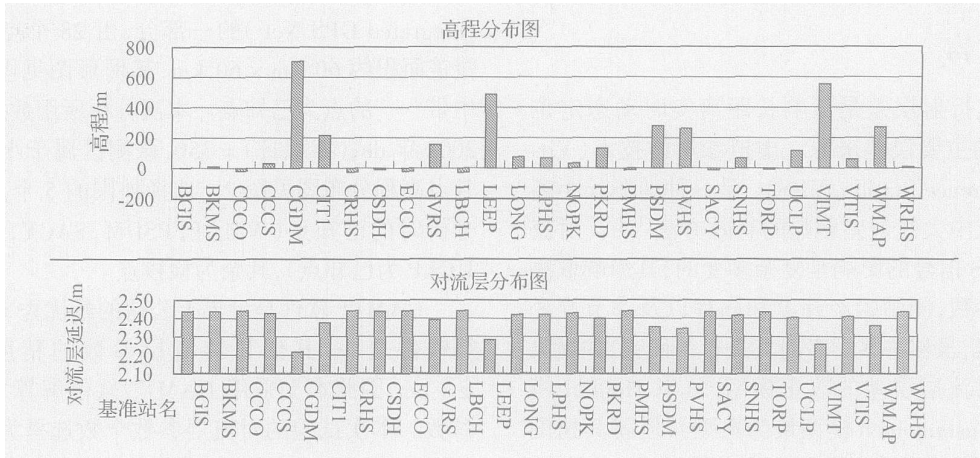


图 2 高程和对流层分布图

Fig. 2 Distributions of elevation and tropospheric delays

表 1 建议的 7 种对流层延迟拟合模型

Tab. 1 Purposed models for tropospheric delay

序号	模型名称	公式	特点及适用范围
1	含 1 个高程因子的三参平面拟合模型(H1QM 3)	$d_T = a_0 + a_1x + a_2y + a_3h$ (2) <i>h</i> 为测站高程	既顾及对流层随平面位置的线性变化又考虑对流层随高程的线性变化。
2	含 1 个高程因子的四参曲面拟合模型(H1QM 4)	$d_T = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4h$ (3)	与式(2)相比,其特点是顾及了对流层在 <i>x</i> 方向和 <i>y</i> 方向具有不同的梯度
3	含 1 个高程影响因子的二次曲面拟合模型(H1QM6)	$d_T = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 + a_6h$ (4)	与以上两个模型相比,该模型考虑了对流层的非线性变化项,适用于对流层变化大的区域网,但其缺点是所需已知点数多(至少 7 个)。
4	仅含一个高程因子的一次曲线拟合模型(H1QX1)	$d_T = a_0 + a_1h$ (5)	其特点是只考虑对流层随高程的变化,而认为对流层与平面位置无关,适用于小测区的对流层误差建模,其优点是所需已知点少(2 个即可)。
5	仅含一个高程因子的二次曲线拟合模型(H1QX2)	$d_T = a_0 + a_1h + a_2h^2$ (6)	与模型(5)相比,其特点是顾及了对流层随高程变化的非线性项。
6	含 2 个高程因子的一次曲面拟合(H2QM 3)	$d_T = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xh + a_4yh$ (7)	该模型既考虑了对流层随平面位置的变化,又考虑了对流层分别在 <i>x</i> 、 <i>y</i> 方向随高程变化的不同梯度。
7	含 3 个高程因子的一次曲面拟合(H3QM 3)	$d_T = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xh + a_4yh + a_5h$ (8)	该模型同时顾及了对流层随高程变化的线性项和在 <i>x</i> 方向及 <i>y</i> 方向不同的变化梯度。

在实际应用中,应根据测区的不同地理、气候等情况,通过不同模型比较,从以上拟合模型中选出最优的拟合模型。

3 实测数据分析

按前面提出的几种对流层拟合模型,利用本文试验网的对流层估计值计算出的检核点的拟合残差曲线见图 3。各种拟合方法的拟合中误差可由各点的拟合残差计算出,各种拟合方法的拟合中误差见表 2。表 2 中的中误差均值是各个时段

的中误差的算术平均值。由表 2 可见,就本算例而言,含一个高程因子的 3 参曲面拟合模型(H1QM3)的精度(±0.007 6 m)好于其他拟合模型。其中含 2 个高程因子的二次曲线拟合精度最差(±0.038 8 m)。而仅含一个高程因子的一次曲线(H1QX1)的拟合精度为±0.008 9,其精度与含一个高程因子的 3 参曲面拟合模型很接近。而 H1QX1 模型的优点是所需支撑点少(2 个),对于 20~30 km 的小测区具有明显优势。

此外,本文还比较了更大的试验网(约

500 km×300 km, 它是前面试验网的扩展) 的拟合精度, 限于篇幅, 有关详细结果未列出。研究结

果表明含一个高程因子的 4 参数曲面拟合模型的拟合精度最好(±0.018 m)。

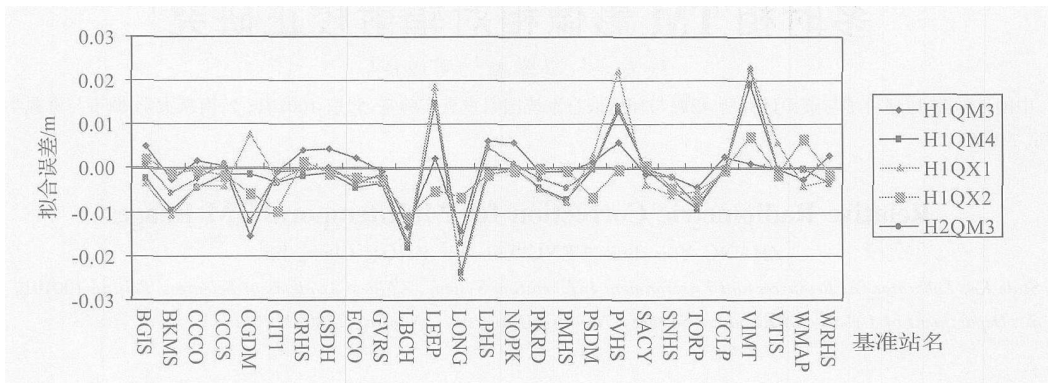


图 3 本文提出的几种建模方法的误差曲线

Fig. 3 Error plot for proposed methods

表 2 由 23 个检核点的拟合残差计算出的拟合中误差

Tab. 2 RMS computed by 23 check points / m

方法 时间	H1QM3	H1QM4	H1QX1	H2QX2	H2QM3
0	0.005 6	0.008 6	0.010 1	0.018 9	0.008 3
2	0.006 4	0.016 1	0.006 9	0.027 8	0.013 7
4	0.008 2	0.010 7	0.008 3	0.060 8	0.01
6	0.005 6	0.009 6	0.006 3	0.004 5	0.007 9
8	0.006 4	0.006 1	0.006 9	0.009 5	0.006 4
10	0.005 5	0.010 7	0.005 3	0.007 5	0.009 2
12	0.005 6	0.013 3	0.004 8	0.003 5	0.011 1
14	0.005 7	0.010 5	0.005 7	0.014 5	0.008 9
16	0.004 8	0.004 8	0.006 9	0.030 5	0.004 2
18	0.008	0.014 3	0.011	0.030 6	0.012 5
20	0.011 4	0.022 1	0.012 6	0.131 2	0.017 7
22	0.012	0.016 4	0.012 3	0.114 7	0.011 8
24	0.013	0.018 3	0.018 4	0.050 2	0.016 4
中误差均值	0.007 6	0.012 4	0.008 9	0.038 8	0.010 6

数的变化率发给流动站, 流动站则根据导航解获得的坐标计算该站的对流层延迟改正数, 并建立虚拟观测量, 用于动态定位。以 H1QM3 模型为例(其他模型与此类似), 虚拟参考站上的对流层延迟改正值可按下式计算:

$$d_T = (a_0 + \dot{a}_0 \Delta t) + (a_1 + \dot{a}_1 \Delta t)x + (a_2 + \dot{a}_2)y + (a_3 + \dot{a}_3)h \quad (9)$$

式中 $\dot{a}_0, \dot{a}_1, \dot{a}_2$ 为对流层模型参数变化率, Δt 为模型参数的龄期。

为检验该模型用于实时动态定位时的精度, 在检核点 CCCO 上, 利用对流层模型 (9) 计算出对流层延迟量(2002 第 350 天), 并与 GAMIT 估计值求差, 以此来检验该模型的精度。图 4 为检核点 CCCO 的对流层模型计算值与 GAMIT 估计值之比较图。将本方法用于实时动态定位时, 对流层误差的建模中误差为 ±9 mm。对流层预报误差与模型参数的数据龄期有关, 数据龄期越大则预报精度越低。

4 对流层误差实时建模精度分析

按前述建模方法获得最优对流层模型后, 可借助某种数据通讯方式, 将对流层模型参数和参

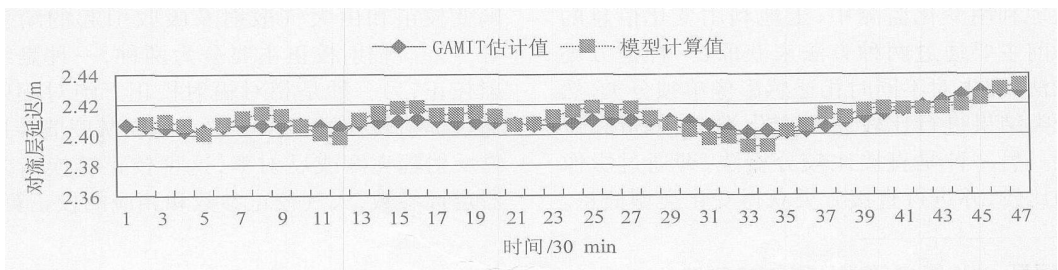


图 4 CCCO 站对流层动态建模值与 GAMIT 估计值比较

Fig. 4 Tropospheric delay using GAMIT and proposed method at CCCO

(下转第 132 页)

二、三级系数的滤波窗口分别为 7×7 , 13×13 , 25×25)来实现干涉图滤波的同等效果。

4 结论

本文在对 InSAR 干涉图小波变换的基础上,通过对各个方向的高频系数中对应方向的边缘位置平滑后做中值滤波处理来实现干涉图的滤波,实验证明,本文用 A Trous 算法实现小波变换对干涉图的滤波处理视觉特征良好,残余点大大减少,很好地保持了图像的边缘特征,是一种有效的 InSAR 干涉图噪声抑制方法。

参考文献:

- [1] GIANCARLO B. A Locally Adaptive Approach for Interferometric Phase Noise Reduction[J]. IEEE-Trans Geoscience and Remote Sensing, 1999, 264-266.
- [2] JIN Guo-wang, et al. INSAR Interferogram Filtering[A]. Modern Communications Theory and Signal Processing-Communications Theory and Signal Processing Symposium 2003 [C]. Beijing Publishing House of Electronics Industry, 2003. (靳国旺,等. INSAR 干涉图的滤波处理[A]. 现代通信理论与信号处理进展—2003 年通信理论与信号处理年会论文集[C]. 北京:电子工业出版社,2003.)

- [3] COIFMAN R R, DONOHO D L. Translation Invariant Denoising[J]. Lecture Notes in Statistics, 1995, 103: 125-150.
- [4] DONOHO D L. De-noising by Soft-thresholding[J]. IEEE Trans Information Theory, 1995, 41(3).
- [5] YUE Huan-yin, GUO Hua-dong, FAN Dian, et al. SAR Interferogram Filtering Based on Stationary Wavelet Decomposition[J]. High Technology Letters, 2002, (5): 5-9. (岳焕印,等. 基于静态小波分解的 SAR 干涉图滤波[J]. 高技术通讯, 2002, (5): 5-9.)
- [6] MALLAT S. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation[J]. IEEE Pattern Anal and Machine Intell, 1989, 11 (7): 674-693.
- [7] NASON G P, SILVERMAN B W. The Stationary Wavelet Transform and Some Statistical Applications [J]. Lecture Notes in Statistics, 1995, 103: 281-299.
- [8] HAN Chun-ming, GUO Hua-dong, WANG Chang-lin. An Enhanced SAR Image Speckle Filter[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(2): 121-127. (韩春明,等. 一种改进的 SAR 图像斑点噪声滤波方法[J]. 遥感学报, 2004, 8(2): 121-127.)
- [9] GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A, WERNER C L. Satellite Radar Interferometry: Two-dimensional Phase Unwrapping [J]. Radio Science, 1988, 23: 713-720.

(责任编辑:雷秀丽)

(上接第 121 页)

7 结论

通过以上分析,就本次试验而言可以得出以下结论:

1. 采用本文建议的对流层延迟建模方法,其精度取决于所用已知点的数量和分布、基准站间的距离以及所采用的拟合模型;本文提出的含高程因子的几种对流层模型,具有较好的拟合精度,拟合参数的个数可根据测区情况选用;

2. 就 $60 \text{ km} \times 60 \text{ km}$ 左右的测区而言,设有 5 个已知点,则含一个高程因子的 3 参平面拟合模型(H1QM3)具有较好的拟合精度($\pm 0.76 \text{ cm}$);对于小测区(小于 $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$),仅含一个高程因子的单参数拟合模型(H1QX1)具有所需已知点少的优点,可根据情况选用。

3. 试验表明,建议的对流层误差建模方法,可用于 VRS 动态定位中的对流层误差改正。

感谢 MIT 授权使用 GAMIT/GLOBK 软件,

感谢 SOPAC 提供 SCIGN 网的 GPS 观测数据。

参考文献:

- [1] VAN DER MAREL H. Virtual GPS Reference Station in the Netherland[A]. Proc ION GPS' 98[C]. Nashville:[s. n.], 1998. 49-58.
- [2] WANNINGER L. The Performance of Virtual Reference Stations in Active Geodetic GPS networks under Solar Maximum Conditions[A]. Proc ION GPS 99[C]. Nashville TN:[s. n.]. 1 419-1 427.
- [3] ZHOU Z M, YI J J, ZHOU Q. GPS Theory and Applications [M]. Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping, 1997. (周忠谟,易杰军,周琪. GPS 卫星测量原理与应用[M]. 测绘出版社,1997.)
- [4] ZHANG J, LACHAPPELLE G. Precise Estimation of Residual Tropospheric Delays Using a Regional GPS Network for Real-time Kinematic Applications[J]. Journal of Geodesy, 2001, 75: 255-266.
- [5] OU J K. Research on the Affect of Neutral Atmospheric Refraction on GPS Observation[J]. Acta Geodetica et Cartographica Sinca, 1998, 27(1): 31-36. (欧吉坤. GPS 测量的中性大气折射改正的研究[J]. 测绘学报, 1998, 27(1): 31-36.)

(责任编辑:张燕燕)