

基于区域 CORS 网精密天顶对流层延迟建模方法研究^{* 1}

黄良珂^{1,2,3)} 刘立龙^{1,2,3)} 姚朝龙^{2,3)} 熊 思^{2,3)}

(1) 广西矿冶与环境科学实验中心, 桂林 541004
(2) 桂林理工大学测绘地理信息学院, 桂林 541004
(3) 广西空间信息与测绘重点实验室, 桂林 541004

摘 要 利用区域 CORS 网参考站已知天顶对流层信息, 提出一种不需要气象数据的天顶对流层新模型。利用广西 CORS 网实测数据, 分析了新模型与反距离加权法和移去恢复法的精度, 结果表明新模型精度有显著提高。

关键词 区域 CORS; 天顶对流层延迟; 建模; 反距离加权法; 移去恢复法

中图分类号: P228.4

文献标识码: A

MODELING FOR PRECISE ZENITH TROPOSPHERIC DELAY BASED ON REGIONAL CORS NETWORK

Huang Liangke^{1,2,3)}, Liu Lilong^{1,2,3)}, Yao Chaolong^{2,3)} and Xiong Si^{2,3)}

(1) Guangxi Scientific Experiment Center of Mining, Metallurgy and Environment, Guilin 541004
(2) College of Geomatic Engineering and Geoinformatics, Guilin University of Technology, Guilin 541004
(3) Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin 541004

Abstract A new model for estimation of zenith tropospheric delays by regional CORS data without any meteorological data was presented, based on the investigation of the relationship between tropospheric delay and the elevation and longitude. Then the accuracies of new model are compared with the direct interpolation method and remove-restore method by using the data from Guangxi CORS, respectively. Research results show a significant improvement for the calculated precision with the new model.

Key words: regional CORS; Zenith Tropospheric Delay (ZTD); modeling; direct interpolation method; remove-restore method

1 引言

对流层延迟是影响 GPS 定位精度的主要误差之一。对流层在不同地区和不同季节变化较大, 若将经验模型应用于区域大气水汽反演, InSAR 大气改正, 精密单点定位等高精度 GPS 测量应用时, 经

验模型难以满足要求^[1]。近年来, 随着城市 CORS 网的建立, 许多学者利用已知参考站的精密对流层信息来建立区域的天顶对流层延迟 (ZTD, Zenith Tropospheric Delay) 模型^[2]。目前, 建立区域对流层延迟改正方法主要有: 反距离加权法, Kriging 法^[3], 移去恢复法^[4], 投影延拓法^[5]等。反距离加权法和

* 收稿日期: 2013-04-27

基金项目: 国家自然科学基金 (41064001); 广西空间信息与测绘重点实验室项目 (桂科能 1207115 - 07); 广西自然科学基金 (2012GXNSFGA060001, 2012GXNSFAA053183); 广西研究生教育创新计划项目 (YCSZ2013077); 广西“八桂学者”岗位专项经费

作者简介: 黄良珂, 男, 1986 年生, 硕士, 研究方向为 GNSS 气象学。E-mail: lkhuang666@163.com

通信作者: 刘立龙, 男, 1974 年生, 博士, 教授, 主要从事 GNSS 技术及应用研究。E-mail: hn_liulilong@163.com

文献[3]的方法计算简单,但只适用于区域较小、地势平坦的地区,且文献[3]需要依赖更多的已知参考站个数;文献[4]的模型精度依赖于经验对流层模型的精度和气象元素的精度;文献[5]的模型具有较高的对流层改正精度,在高海拔地区,也能保证较高的精度,但其模型需要较精确的气象元素。针对上述问题,在分析测站高程和经度对天顶对流层影响的基础上,利用 CORS 网参考站的已知天顶对流层信息建立了一种不需要任何气象元素,只与时间和测站位置有关的天顶对流层新模型。

2 ZTD 与测站位置关系分析

2.1 ZTD 在高程方向上的影响分析

为分析 ZTD 与测站高程的变化关系,笔者从 IGS 中心下载了 2011 年 28 个 IGS 站的天顶对流层延迟产品,对 28 个 IGS 站的对流层值分为 4 个季度分别进行 ZTD 与高程关系的统计,其统计结果见图 1。

从图 1 看出,4 个季度中,ZTD 与测站高程变化趋势相同,且 ZTD 与测站高程呈现负指数关系,因此,高程方向上对 ZTD 的影响可表示为

$$ZTD(h) = A_0 \exp(-A_1 h) \tag{1}$$

式中, h 为参考站或者流动站高程, $ZTD(h)$ 为高程方向上影响天顶对流层的值, A_0 、 A_1 是模型参数。

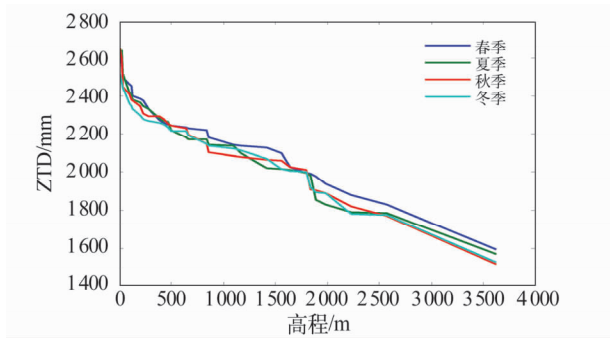


图 1 测站 ZTD 与季节、测站高程的关系
Fig. 1 Relation of ZTD with season and elevation of stations

2.2 ZTD 与测站经度变化分析

相关研究表明,对流层延迟在水平方向上存在线性变化^[6],为了进一步分析对流层延迟与测站经纬度的变化关系,下载了 IGS 站中 2011 年 WUHN 站(114.3°E,30.4°N,22.0 m)和 SHAO 站(121.2°E,30.9°N,25.8m)的全年天顶对流层产品进行分析,因为 WUHN 站和 SHAO 站的纬度和高程比较接近,经度相差较大,分析测站经度对 ZTD 的影响的条件比较理想。两个测站的统计结果如表 1 和表 2 所示。

由表 1 知,两个测站的 ZTD 季度平均值和年度均值基本一致,由此表明,测站经度变化对测站 ZTD

的影响较小。对流层延迟在水平方向上的变化主要表现在纬度变化上,且与纬度变化呈线性关系。

由表 2 看出,除了 WUHN 站 5 月份数据缺失外,两个测站的月平均 ZTD 值相差较小,在 7 月和 8 月时差值最大为 1.8 cm。

表 1 2011 年 WUHN 站和 SHAO 站 ZTD 季度平均和年平均统计(单位:m)

Tab. 1 Seasonal mean value and annual mean value of ZTD for the data from WUHN and SHAO(单位:m)

IGS 站名	春季	夏季	秋季	冬季	年均
WUHN	2.422	2.617	2.568	2.426	2.508
SHAO	2.418	2.621	2.566	2.430	2.509

表 2 2011 年 WUHN 站和 SHAO 站月平均 ZTD 统计(单位:m)

Tab. 2 Monthly mean value of ZTD for the data from WUHN and SHAO in 2011(unit: m)

站名	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
WUHN	2.395	2.408	2.417	2.440	缺数	2.617
SHAO	2.398	2.405	2.417	2.432	2.482	2.607
站名	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
WUHN	2.616	2.621	2.590	2.494	2.470	2.414
SHAO	2.634	2.639	2.573	2.485	2.481	2.411

3 新模型的建立

算例选用广西 CORS 网 10 个 CORS 站 2010 年 8 月 4 日的实测数据及相关气象数据,采样间隔为 15 秒,并选取 XIAN(西安),WUHN(武汉),SHAO(上海)进行联合解算,其中广西 CORS 站和气象站的分布如图 2 所示。

采用 GAMIT10.35 对广西 CORS 站实测数据进行天顶对流层估计。每 2 小时选取一个待估参数,估计时先验天顶对流层延迟采用Saastamoinen模型,气

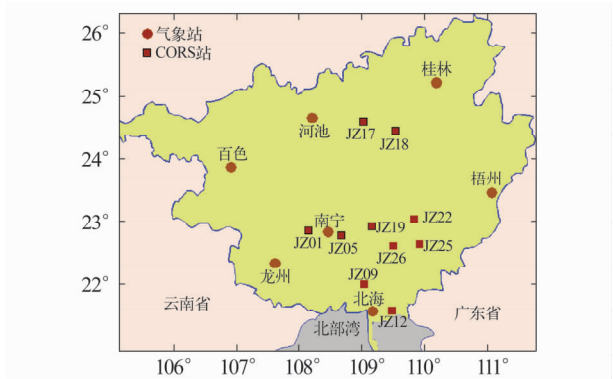


图 2 广西 CORS 站和气象站的分布
Fig. 2 Distribution of CORS stations and meteorological stations in Guangxi

象条件选取标准大气压。由于 GAMIT 估算的天顶对流层延迟精度优于 $1\text{ cm}^{[7]}$, 因此本文算例分析以 GAMIT10.35 解算的天顶对流层延迟作为真值。

通过各参考站对应时刻的已知天顶对流层延迟建立与时间和位置有关的区域对流层延迟模型, 即 $ZTD_i(h, \varphi, t) = A_0(t) + A_1(t) \exp(-A_2(t)h_i) + A_3(t)\varphi_i$ (2)

式中, $ZTD_i(h, \varphi, t)$ 为观测 t 时刻第 i 测站的已知天顶对流层, h_i, φ_i 分别是 t 时刻第 i 测站的大地高和纬度, $A_i(t)$ 是与时间 t 有关的参数。从式(2)可见, 新模型需要至少 4 个已知参考站才能解算出 t 时刻的 $A_i(t)$ 参数。参数 $A(t)$ 可以通过迭代求解, 且收敛较快。由于 $A(t)$ 是一个关于时间 t 的函数, 按多项式展开为

$A_i(t) = d_0^i + a_1^i t + a_2^i t^2 + a_3^i t^3 + \cdots + a_n^i t^n$ (3)

式中 $a_0^i, a_1^i, \cdots, a_n^i$ 为参数 $A_i(t)$ 在 t 时刻的多项式系数, 利用多个时段的参数 $A(t)$, 即可求出各个参数的多项式系数, 多项式的阶数可通过显著性检验来自动选取^[8]。得到参数 $A(t)$ 关于时间 t 的函数后, 即可求出测站任何历元的天顶对流层延迟。

4 实例结果分析

为了验证新模型的精度, 选取广西 CORS 网中 JZ01、JZ09、JZ17、JZ19、JZ22、JZ25 为已知参考站, JZ05、JZ18、JZ26 测站作检核使用, 算例实验区域为 $21^\circ \sim 25^\circ \text{N}, 107.5^\circ \sim 110.5^\circ \text{E}$ 。利用 2011-08-04 日 6 个参考站 GAMIT 解算的已知天顶对流层延迟数据, 对比分析新模型与反距离加权法和移去恢复法的精度。对于移去恢复法, 其经验模型采用 Saastamoinen 模型, 由于无法获取参考站实测气象数据, 采用文献[9]的方法, 通过计算参考站周边的气象站实测气象数据获得。利用 3 种模型分别计算对应时刻的 JZ05、JZ18、JZ26 测站的天顶对流层值, 并将模型计算的天顶对流层值与 GAMIT 估计值作比较, 结果如表 3 和图 3 所示。

从表 3 和图 3 可知, 移去恢复法精度最差, 其平均中误差达到了 34.5 mm , 反距离加权法次之, 为 16.9 mm , 新模型的精度最高, 为 8.8 mm 。经分析,

移去恢复法精度较差的原因是移去恢复法的精度依赖于 Saastamoinen 模型和实测气象元素的精度, 若忽略气象元素引起的误差, 仅考虑它使用的 Saastamoinen 模型, 其精度仅为 $4 \sim 5\text{ cm}^{[10]}$; 反距离加权法适用于小测区且参考站分布较密集的情况, 由于本次试验参考站数量只有 6 个且实验区域较大, 故不能保证其精度。

为进一步验证新模型在恶劣天气的适用性, 选取 JZ12 测站作为检核验证。由于 JZ12 测站在 2011 年 8 月 4 日的降雨量达 6.9 mm , 其他 9 个参考站均为晴天。3 种模型计算的天顶对流层延迟与 GAMIT 估计值的比较结果如图 4。

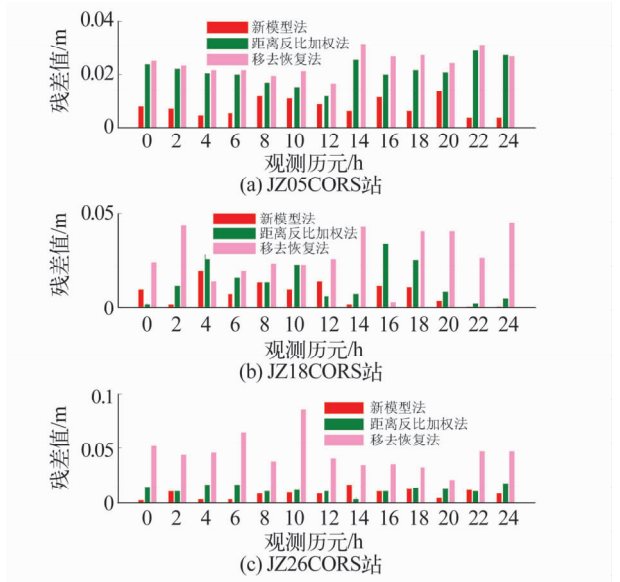


图 3 不同模型计算得到的天顶对流层延迟精度
Fig. 3 Comparison of zenith tropospheric delay accuracy calculated with various models

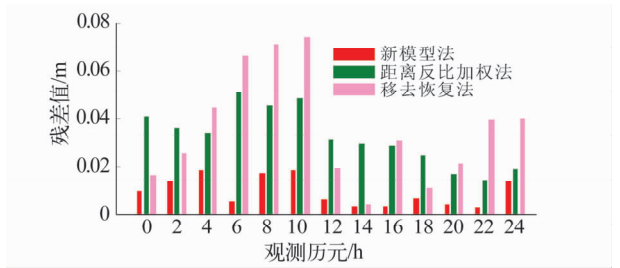


图 4 不同模型在 JZ12 站的精度对比
Fig. 4 Accuracy with various model for the data from JZ12

表 3 不同模型得到的天顶对流层延迟残差统计 (单位: mm)
Tab.3 Errors of zenith tropospheric delay with various model (unit:mm)

测站	新模型法			反距离加权法			移去恢复法		
	最大值	最小值	均方误差	最大值	最小值	均方误差	最大值	最小值	均方误差
JZ05	13.4	3.5	8.4	28.9	11.9	21.7	31.8	16.6	25.1
JZ18	18.8	0.5	9.4	33.3	1.7	16.9	44.9	2.5	31.2
JZ26	16.3	2.0	8.8	17.6	2.3	12.2	85.4	20.7	47.2

由图 4 可知,新模型法计算天顶对流层延迟的均方误差为 11.6 mm,反距离加权法为 34.1 mm,移去恢复法为 41.9 mm,可见新模型法明显优于其他 2 种方法,下雨天新模型法也能保证其较高的精度。

5 结语

通过广西 CORS 网实测数据验证分析表明,利用新模型法计算的天顶对流层延迟的平均精度为 8.8 mm,明显优于其他两种方法(尤其在下雨天),且能保证 11.6 mm 的精度。由于新模型不需要气象参数,只与时间和位置有关,因此,在 InSAR 大气改正等高精度导航定位中具有一定的应用价值。本文实验数据获取有限,新模型在其他区域适用情况有待进一步验证。

致谢 衷心感谢广西测绘局和 IGS 中心分别为本实验提供 CORS 网实测数据和 ZTD 数据!

参 考 文 献

1 聂建亮,等. 基于 CORS 网对流层信息的精密单点定位[J]. 大地测量与地球动力学,2010,(2):91-93. (Nie Jianliang, et al. Precise point positioning based on tropospheric refraction CORS[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2010,(2):91-93)

2 戴吾蛟,等. 区域精密对流层延迟建模[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2011,36(4):392-395. (Dai Wujiao, et al. Modeling regional precise tropospheric delay[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2011,36(4):392-395)

3 Li Z W, et al. Modeling of atmospheric effects on InSAR measurements by incorporating terrain elevation information[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2006(68):1 189-1 194.

4 Zheng Y and Feng Y. Interpolating residual zenith tropo-

spheric delays for improved regional area differential GPS positioning[R]. ION GPS-2005, Long Beach, California, 2005.

5 王潜心,许国昌,陈正阳. 利用区域 GPS 网进行高海拔流动站的对流层延迟量内插[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2010,35(12):1 405-1 407. (Wang Qianxin, Xu Guochang and Chen Zhengyang. Interpolation method of tropospheric delay of high altitude stations based on regional GPS network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2010,35(12):1 405-1 407)

6 陈招华,戴吾蛟. 区域对流层延迟水平变化对 GPS 测量精度的影响[J]. 大地测量与地球动力学,2010,(3):83-87. (Chen Zhaohua and Dai Wujiao. Influence of horizontal variation of tropospheric delay on GPS surveying[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2010,(3):83-87)

7 殷海涛,等. GPS 信号对流层延迟改正新模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2007,32(5):454-457. (Yin Haitao, et al. New model for tropospheric delay estimation of GPS signal[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2007,32(5):454-457)

8 徐天河,杨元喜. 坐标转换模型尺度参数的假设检验[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2001,26(1):70-72. (Xu Tianhe and Yang Yuexi. The hypothesis test of scale parameter in coordinate transformation model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2001,26(1):70-72)

9 Musa T A, et al. GPS meteorology in a low-latitude region: Remote sensing of atmospheric water vapor over the Malaysian Peninsula[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics,2011(73):2 410-2 422.

10 熊永良,等. 基于多个 GPS 基准站的对流层延迟改正模型研究[J]. 工程勘察,2005,(5):55-57. (Xiong Yongliang, et al. Study on model for tropospheric delay based on multi-reference-stations[J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2005,(5):55-57)