

对流层模型在中国区域的精度评估

王君刚^{1,2,*} 陈俊平² 王解先¹

1. 同济大学测绘与地理信息学院 上海 200092; 2. 中国科学院上海天文台 上海 200030

1 序言

大气延迟是全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)主要误差源之一, 大气延迟主要包括对流层延迟与电离层延迟, 后者可以通过无电离层组合消除。对流层延迟分为干延迟和湿延迟, 其中干延迟可以通过气象参数准确建模, 而湿延迟难以精确建模, 在精密定位中常作为参数估计。对流层天顶延迟(Zenith Total Delay, ZTD)约为 2.3m, 在 10°高度角时斜路径延迟量可达 20m^[1]。GNSS 应用中, 通常采用投影函数(如 NMF^[iii]、GMF^[iiii]、VMF1^[iv])将斜路径延迟量投影到天顶方向进行计算。

对流层模型包括 Saastamoinen^[v]、Hopfield^[vi]、Black^[vii]等气象模型以及基于数值天气预报模型(Numerical Weather Model, NWM)的 EGNOS、UNB3m 等模型。前者使用时要用到测站实测气象参数, 如气温、气压、湿度, 后者则只需要测站信息以及时间。此外, 还有 GPT^[viii]、GPT2^[ix]等数字气象模型可以提供测站的气象数据, 然后采用 Saastamoinen 等模型计算测站的对流层天顶延迟。

由于各模型建模所采用的数据不同, 其在不同区域的适用性也不同。有必要对各模型的精度进行分析。曲伟菁^[x]等人对 Hopfield、Saastamoinen 以及 EGNOS 模型在全球范围内进行了改正精度与使用范围的评估, 指出 Hopfield 模型的缺陷, 论证了 EGNOS 模型的有效性; 张双成^[xi]等人采用三个 IGS 测站对 Saastamoinen、EGNOS、UNB3m 模型的精度进行了分析。

上海天文台 GNSS 分析中心(GNSS Analysis Center at Shanghai Astronomical Observatory, SHAO)对全球 110 个 IGS 测站和中国区域的 260 个陆态网测站的 GPS/GLONASS 观测数据进行处理, 其提供的精密 GPS 轨道与钟差产品与 IGS 一致^[xii], 其中 GPS 轨道精度为~1.4cm, 钟差精度为~41ps, 包括 30s 的精密卫星钟差产品^[xiii]。SHAO 解算时, 固定 GPT 模型的干延迟量, 每小时估计一个湿延迟改正量, 投影函数采用 GMF。

常用的全球对流层模型如 UNB、EGNOS、GPT、GPT2 在全球范围内都有较好的精度, 但是在中国区域缺乏精度分析比较, 而随着中国区域卫星导航定位的迅速发展, 有必要对这几种模型的适用性与精度进行评估。本文采用上海天文台解算陆态网 223 个测站 2012 年的 ZTD 数据, 对 UNB3m、EGNOS、GPT、GPT2 模型在中国区域的精度进行了详细分析, 其分析结果可以为中国区域 GNSS 解算的对流层选择提供一定的参考价值。

2 精度分析

计算陆态网中国区域 223 个测站 2012 年各个模型的 ZTD 单天值, 与 GPS 解算值进行比较, 统计其均方根误差 RMS 平均偏差 BIAS, 如式(1)。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ZTD_i^{GPS} - ZTD_i^{Model})^2}$$

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ZTD_i^{GPS} - ZTD_i^{Model})$$
(1)

式中, ZTD_i^{GPS} 为由 GPS 观测数据解算的天顶延迟量, ZTD_i^{Model} 为各个模型的天顶延迟量。各个测站的 BIAS 与 RMS 分布见图 1、图 2。

从图 1 中可以看出, EGNOS、UNB3m 模型在中国北部地区的 BIAS 普遍小于 0, 在南方地区大于 0, UNB3m 模型的平均偏差小于 EGNOS 模型; GPT 模型在东南沿海地区 BIAS 高于其他模型, 最大可达 10cm, 在新疆部分地区 BIAS 也较大; 这可能是由于 GPT 模型并未提供湿度信息, 采用经验相对湿度 60%所导致的。GPT2 模型在全国范围内 BIAS 均比较大, 但是绝对值变化比较小, 只有在四川省区

域较大, 可达 5cm。从图 2 可以看出, 各个模型的 RMS 都有相同的地域分布趋势: 西北地区 RMS 较小, 东南沿海地区 RMS 较大, 这是由于东南沿海地区夏季水汽丰富较为湿润, 湿延迟难以精确估计导致的。各个模型之间, GPT2 模型 RMS 最小, EGNOS 最大, 其次是 UNB3m、GPT, 而 GPT 模型在东南沿海地区的 RMS 远远大于其他三种模型, 这也是采用了经验相对湿度导致的。GPT2 模型在四川省地区的 RMS 高于其他地区, 也高于其他模型在四川省区域, 这可能是由于四川地区大气环境比较独特, 而 GPT2 全球适用性较好, 而在该区域适用性较差。

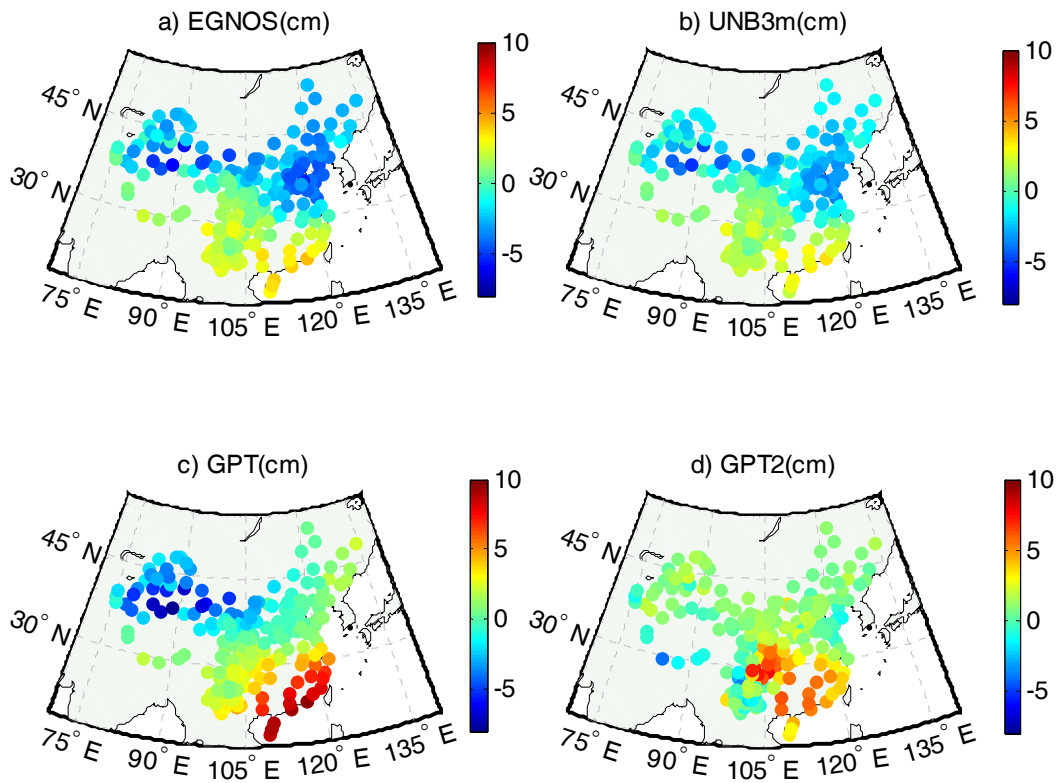


图 1 不同模型在中国区域的 ZTD 全年平均偏差(BIAS)

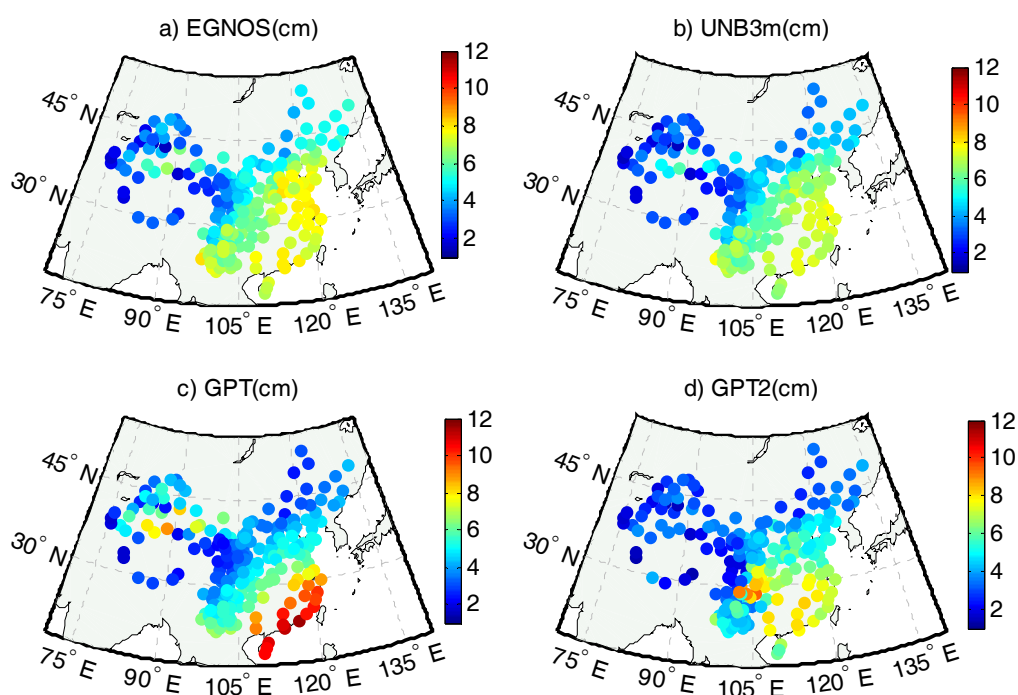


图 2 不同模型在中国区域的 ZTD 全年中误差(RMS)

统计所有测站对流层延迟 BIAS 与 RMS 的均值、最大值、最小值, 结果见表 1。从表中可以看出, 四种模型中, GPT2 模型的天顶延迟量精度最高, 其 RMS 均值只有 4.6cm, EGNOS 模型 RMS 均值最大, 可达 5.6cm; 但是 GPT2 模型 RMS 最大值要大于 EGNOS 模型与 UNB3m 模型; GPT 模型各测站平均 RMS 为 5.0cm, 与 UNB3m 模型相当, 但是 GPT 模型的 RMS 最大值可达 11.4cm。此外, ENGOS、UNB3m、GPT 模型各测站的 BIAS 均值的绝对值均不大于 1cm, 而 GPT2 模型的各测站平均偏差 BIAS 为 1.5cm, 较其他模型都偏大, 与图 1 相符合。

表 1 不同模型在中国区域的精度

	EGNOS	UNB3m	GPT	GPT2
RMS 均值(cm)	5.6(1.6,8.2)	5.1(1.5,7.7)	5.0(1.7,11.4)	4.6(1.4,9.5)
BIAS 均值(cm)	-0.6(-5.8,4.2)	-0.3(-5.0,3.5)	0.7(-7.9,9.4)	1.5(-3.8,7.7)

注: 表中数据以均值(最小值, 最大值)表示

3 结论

对流层延迟误差作为 GNSS 定位的主要误差源之一, 其模型精度影响着定位精度。文章比较了四种常用模型 EGNOS、UNB3m、GPT、GPT2 的天顶延迟量在中国区域的精度, 通过分析得出了一些有意义的结论: GPT2 模型在中国区域的精度最高, 其 RMS 仅为 4.6cm, 但是其 BIAS 均值最大, 为 1.5cm; EGNOS 模型各测站平均 RMS 最大, 可达 5.6cm; 在地域上, 各个模型的 RMS 在西北地区都要小于东南地区; EGNOS、UNB3m、GPT 模型的 BIAS 呈现北方小于 0, 南方大于 0 的分布特征; GPT2 模型 BIAS 在全国范围内普遍大于 0, 但是 BIAS 绝对值的变化小于其他模型。文章的分析结果可以为中国区域用户在导航定位时对流层改正模型的选择提供一定的参考借鉴意义。

参考文献

- [1] 殷海涛, 黄丁发, 熊永良等. GPS 信号对流层延迟改正新模型研究. 武汉大学学报(信息科学版), 2007,32(5):454-457
- [2] Niell, A. E. (1996). Global mapping functions for the mapping of the atmospheric delay at radio wavelengths. Journal of Geophysical Research, Vol. 101, No B2, pp. 3,227-3,246.
- [3] Johannes Böhm, Arthur Niell, Paul Tregoning, et al. The Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function

- based on numerical weather model data[J]. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L07304, doi:10.1029/2005GL02554
- [4] J. Kouba. Implementation and testing of the gridded Vienna Mapping Function 1 (VMF1) [J]. *J Geod* (2008) 82:193–205. DOI 10.1007/s00190-007-0170-0
- [5] Saastamoinen J. Contribution to the theory of atmospheric refraction Part II, refraction corrections in Satellite Geodesy. *Bulletin Geodesique*, 1972, (107):13-34
- [6] Hopfield H S. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *J. Geophys. Res.*, 1969, 74(18):4487-4499
- [7] Black H D. An easily implemented algorithm for the tropospheric range correction. *J. Geophys. Res.*, 1978, 83(B4):1825-1828
- [8] Böhm, J., R. Heinkelmann, and H. Schuh (2007), Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications, *J. Geod.*, 81(10), 679–683, doi:10.1007/s00190-007-0135-3
- [9] K. Lagler, M. Schindelegger, J. Böhm, et al. GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 40, 1069–1073, doi:10.1002/grl.50288, 2013
- [10] 曲伟菁, 朱文耀, 宋淑丽. 三种对流层延迟改正模型精度评估[J]. *天文学报*, 2008, 49 (1): 113-122.
- [11] 张双成, 张鹏飞, 范朋飞. GPS 对流层改正模型的最新进展及对比分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2012, 32(2):91-95
- [12] Junping Chen, Bin Wu, Xiaogong Hu, et al. (2012). SHA: the GNSS Analysis Center at SHAO, in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, v 160 LNEE, p 213-221, 2012, Proceedings - 3rd China Satellite Navigation Conference, CSNC 2012, Revised Selected Papers
- [13] Junping Chen, Yize Zhang, Xuhua Zhou, et al. (2013): GNSS Clock Corrections Densification at SHAO: from 5 minutes to 30 seconds. *SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy*, Doi:10.1007/s11433-013-5181-7, pp. 1-10, July 2013.