

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2014.03.07

GNSS 对流层延迟映射模型分析

王君刚^{1,2}, 陈俊平², 王解先^{1,3}

(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; 3. 现代工程测量国家测绘地理信息局重点实验室, 上海 200092)

摘要: 介绍了 GNSS 定位中常用的三种对流层映射函数 NMF、GMF、VMF1 和一种新的模型——GPT2, 通过测站气压、天顶静力学延迟分量以及投影函数参数三个方面对这几个模型进行了比较。采用不同的模型对全球均匀分布的 30 个 IGS 测站 2012 年全年的 GPS 观测数据进行精密单点定位, 分析了不同模型解算的测站坐标与对流层天顶延迟精度。分析结果表明: 以实测气压为基准, VMF1 模型气压误差仅为 0.4%, GPT2 模型相对于 GPT 模型改善了约 25%; 以 VMF1_HT 模型为基准, GPT 和 GPT2 模型天顶静力学延迟中误差约为 1 cm, GPT2 模型精度略优于 GPT 模型; 以 VMF1 网站发布的测站 VMF1 模型为基准, GPT2 模型的干、湿映射函数参数 a_h 、 a_w 中误差约为 1×10^{-5} 和 5×10^{-5} ; 在 IGS08 框架下, GMF/GPT 与 VMF1/GPT2 模型的 PPP 坐标解精度比 NMF 提高了 22%; 两模型定位精度与 ZTD 精度都明显高于 NMF 模型。

关键词: 对流层延迟; 映射函数; 精密单点定位; GPS

中图分类号: P228.4 文献标识码: A

1 引 言

对流层是指地面向上约 40 km 范围内的大气层, 约占大气层总质量的 99%, 也是各种气象现象主要的出现区域。电磁波在对流层的传播速度与大气折射率有关, 而整个对流层的折射率是不同的, 因此电磁波在经过对流层时会产生弯曲和延迟, 延迟量在天顶方向可达 $2 \text{ m}^{[1]}$ 。对流层大气折射率与气压、温度、湿度有关, 一般将天顶总延迟 (Zenith Total Delay, ZTD) 分为静力学延迟 (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD) 和湿延迟 (Zenith Wet Delay, ZWD)。静力学延迟约占总延迟量的 90%, 可以通过实测气压和气温精确计算。而由于大气中水汽变化很大, 湿延迟不能通过模型精确计算, 是电磁波测地技术 (如 VLBI, GPS) 中的

收稿日期: 2013-12-31; 修回日期: 2014-04-22

资助项目: 中国科学院百人计划; 863 计划 (2013AA122402, 2014AA123102); 国家自然科学基金 (40974018, 11273046); 上海市科学技术委员会 (12DZ2273300, 13PJ1409900)

通讯作者: 王君刚, wangjungang2009@yeah.net

一个重要误差源；通常的解决办法是通过模型计算静力学延迟量作为已知值，将湿延迟作为未知数解算^[2]。

通常情况下电磁波传播路径并不是沿天顶方向，因此需要将天顶方向延迟量映射到某一倾斜的传播方向，这就需要映射函数 (Mapping Function, MF)，倾斜方向的对流层延迟量是干、湿映射函数与天顶干、湿分量的乘积之和，关系式为：

$$z(e) = z_h \times m_{f_h}(e) + z_w \times m_{f_w}(e) \quad , \quad (1)$$

式中， $z(e)$ 为总延迟量， z_h 、 z_w 分别为天顶干、湿延迟量， $m_{f_h}(e)$ 、 $m_{f_w}(e)$ 分别是干、湿映射函数， e 是高度角。映射函数 MF 通常采用连分式^[2]：

$$m_f(e) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin e + \frac{a}{\sin e + \frac{b}{\sin e + c}}} \quad , \quad (2)$$

式 (2) 中，参数 a 、 b 、 c 是远小于 1 的常数，干、湿映射函数分别用不同的参数 (a_h, b_h, c_h) 和 (a_w, b_w, c_w)。常用的映射函数有 NMF (Neill Mapping Function)、VMF1 (Vienna Mapping Function 1)、GMF (Global Mapping Function)，各映射函数之间的差别主要表现在参数 a 、 b 、 c 的区别上。映射函数的准确性必然影响倾斜延迟量的精度，从而影响定位精度，尤其是当高度截止角很小时，影响更明显。根据 Boehm 等人提出的经验法则^[3]，在高度截止角为 5° 时，如果干映射函数系数误差为 0.01 或湿映射系数误差为 0.001，测站高程方向误差将达 4 mm；因此映射函数对于 GNSS 解算的精度影响较大。

此外，由于定位解算时干分量是作为已知数，而干、湿映射函数不同，干分量的误差不能通过湿分量估计来补偿，因此干分量误差也将影响测站坐标尤其是高程方向的精度^[3]。一般来讲，测站高程误差约是干分量延迟误差的 1/5。

本文将分别介绍气象模型 VMF1、GPT (Global Pressure/Temperature)、GPT2 (Global Pressure/Temperature 2) 和映射函数 NMF、VMF1、GMF，着重介绍 VMF1 和新模型 GPT2。分两步比较各模型之间的差别：(1) 直接比较各模型的各项参数；(2) 使用上海天文台和同济大学研发的 GNSS (Global Navigation Satellite System) 精密定位软件 LTW_BS^[4]，通过精密单点定位 (Precise Point Position, PPP) 处理了 30 个 IGS 测站 2012 年全年的数据，分析各模型定位结果的精度。

测站分布见图 1，这 30 个 IGS 站在南、北半球低中高纬度都有分布。

2 常用对流层延迟模型

为构建高精度映射函数，很多学者做了大量研究，提出了多种映射函数，包括 Chao 映射函数、Davis 的 CFA2.2 映射函数、Ifadis 映射函数以及 Herring 的 MTT 函数。本文下面

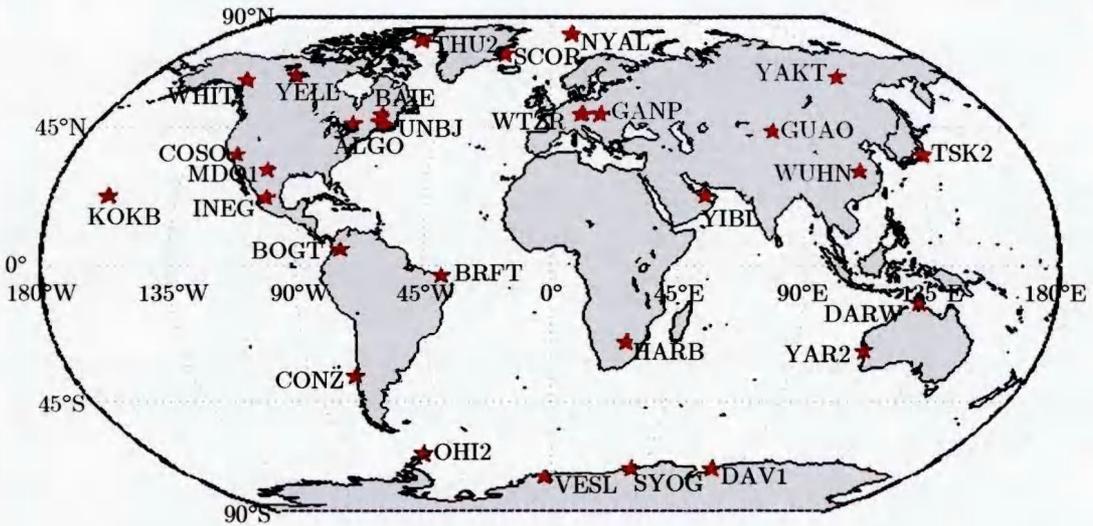


图 1 本文所用测站分布

将总结近年来研究较多的 NMF、GMF/GPT 以及 VMF1 模型, 然后介绍 Boehm 等人刚提出的 GPT2 模型。

2.1 NMF 模型

NMF 模型是 Neill 利用全球分布的 26 个探空气球站资料建立的全球大气延迟投影函数^[5]。NMF 映射函数同样采用式 (2), 干映射系数 a_h 计算如下:

$$a_h(\varphi, t) = a_{\text{avg}}(\varphi) + a_{\text{amp}} \cos(2\pi(t - 28)/365.25) \quad (3)$$

式中, φ 为测站纬度, t 是年积日, 参数 a_{avg} 、 a_{amp} 由 NMF 系数表提供的与测站纬度最近的纬度值线性内插而来, 参数 b_h 、 c_h 以及 a_w 、 b_w 、 c_w 也由 NMF 提供的参数表^[5] 线性内插获得。NMF 模型采用美国标准大气模式中北纬一些测站的温度值和相对湿度廓线, 并且认为南北半球对称, 因此在南半球其精度较差^[6]。

2.2 VMF1 模型

VMF1 模型是由 Boehm 等人提出的对流层映射模型^[2,3], 建立在基于欧洲中尺度气象预报中心 (Europe Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 40 年观测数据的再分析 (ECMWF Reanalysis 40, ERA40) 的基础上。2004 年 Boehm 等人提出 VMF 模型^[7], 随后改正了 VMF 模型的映射函数参数 b 、 c , 从而发展了 VMF1。VMF1 模型是基于 IGS 和 VLBI 站的, 只能应用于这些测站, 这是其主要缺陷; 因此又发展了格网 VMF1 模型, 在附加高程改正后修改为 VMF1-HT 映射函数。本文中, 基于基准站的 VMF1 简称为 S.VMF1, 格网 VMF1 简称 G.VMF1; 这两种模型精度水平相当。

VMF1 模型通过提取 ECMWF 提供的初始高度角 3.3° 的湿折射率资料, 利用射线追踪法得到全球经纬方向分辨率为 $2.5^\circ \times 2.0^\circ$, 时间分辨率 6 h 的全球格网点干、湿映射函数参数 a_h 、 a_w 。结果可以从维也纳理工大学大地测量研究所网站 (<http://ggsatm.hg.tuwien.ac.at>)

获取。

VMF1-HT 映射函数的参数 $b_h = 0.0029$, c_h 是与年积日、纬度有关的函数, 公式如下:

$$c_h = 0.0062 + \left(\left(\cos \left(2\pi \frac{t-28}{365} + \Psi \right) + 1 \right) \times \frac{c_{11}}{2} + c_{10} \right) \times (1 + \cos \varphi) . \quad (4)$$

在北半球时 $c_{10} = 0.001$, $c_{11} = 0.005$, $\Psi = 0$; 南半球时 $c_{10} = 0.002$, $c_{11} = 0.007$, $\Psi = \pi$ 。湿映射参数采用 NMF 模型在 45° 的值, 即 $b_w = 0.00146$, $c_w = 0.04391$ 。VMF1 映射函数的模型以及相关实现函数可以从其官方网站 (<http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/SOURCE>) 下载。

此外, G-VMF1 模型也提供格网点上的天顶干湿延迟分量, 用户可以通过格网点的数值采用一定的内插算法获取测站的映射函数参数 a_h , a_w , 以及测站天顶干湿延迟分量 z_h , z_w 。

2.3 GMF/GPT 模型

VMF1 模型计算时需要读取格网数据进行内插, 计算繁琐, 因此 Boehm 等人在 VMF1 的基础上进行改善, 建立了类似 NMF 易于实现且精度相当于 VMF1 的 GMF/GPT 模型^[8-10]。

GMF 映射函数同样是基于 ERA40 的月平均数据, 采用类似建立 VMF1 模型的射线轨迹法, 使用 1999 年 9 月—2002 年 8 月的数据确定映射参数 a_h 和 a_w , 参数 b , c 和 VMF1 相同, 具体的计算程序在 VMF1 官网上也可以下载。而计算对流层延迟所需要用到的气象参数则通过 GPT 模型获取。

GMF/GPT 模型是 VMF1 模型的简化, 精度略逊于 VMF1 模型; GMF/GPT 在计算上更简便, 虽然 GPT 模型计算的 ZHD 有部分系统误差, 但正好可以补偿大气负荷的影响, 因此在不改正大气负荷的时候 GPT 模型比基于 ECMWF 的 VMF1 模型精度略高^[11]。

2.4 GPT2 模型

GPT2 模型是 Boehm 等人在 2012 年提出的一种新的对流层延迟经验模型^[12]。GPT2 与 GMF/GPT 之间的差别^[13]见表 1。

表 1 GPT2 相对于 GPT 的改进情况

	GMF/GPT	GPT2
NWM 数据	1999—2002 年 ERA40 提供的月平均廓线	2001—2010 年 ERA-Interim 提供的月平均廓线
地形数据	平均海平面上的 9 阶球谐函数	基于 ETOPO5 平均高程的 5° 格网
时间变化	平均及年变化周期项	平均、年及半年周期项
相位	固定到 1 月 28 日	估计值
温度变化	假定为常数, $-6.5^\circ\text{C}/\text{km}$	在每个格网点估计平均、年以及半年周期项
气压变化	基于标准大气压的指数	基于格网点实际气温的指数
输出参数	气压、气温以及干湿映射函数参数	气压、气温、温度变化率、水汽压、干湿映射函数参数

Boehm 等人采用 VieVS (Vienna VLBI Software) 软件对 1984 年—2012 年的观测数

据进行处理分析认为, 在考虑大气负荷效应改正的情况下, GPT2 定位模型精度要高于 GMF/GPT 模型, 因此建议在对流层延迟计算中使用 GPT2 模型代替 GMF/GPT 模型。

3 各模型之间的直接比较

下面将直接比较各模型结果之间的差异。首先比较 GPT、GPT2 以及 VMF1 模型气压与测站实测气压; 此外, 由于目前对流层估计模型中最精确的是 VMF1, 因此还将分别比较 GPT、GPT2 模型与 S_VMF1 模型天顶静力学延迟分量的差别; 最后将比较 GPT2 模型与 VMF1 模型的干、湿映射函数参数 a_h , a_w 。计算中所使用的测站分布见图 1。

3.1 气压参数

根据纬度分布选取了 8 个测站, 分别用 GPT、GPT2 两种模型计算 2012 年全年各测站的单日气压值, 将 S_VMF1、GPT 以及 GPT2 三种模型的气压值与测站气象文件提供的单日气压平均值比较, 各模型气压与实测气压之差的中误差见图 2。

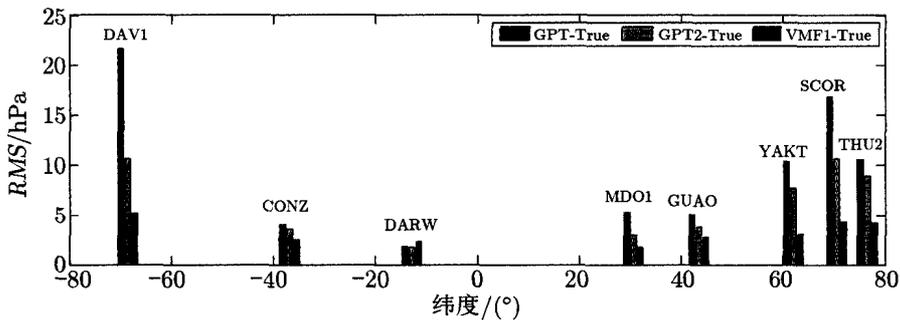


图 2 2012 年三种模型气压偏差中误差

由图 2 可以看出, S_VMF1 模型的气压与实测气压最接近, 误差小于 0.4%; 而 GPT2 模型气压与实测气压的偏差中误差约为 GPT 模型偏差中误差的 75%, 更符合实测气压, 因此在气压参数上, GPT2 模型气压精度要高于 GPT 模型。此外, 随着纬度的增高, 三种模型气压相对于实测气压误差都变大; 而在高纬度测站, GPT2 模型相对于 GPT 模型改正更明显。

10 hPa 的气压误差引起的天顶静力学延迟误差为 20 mm。当假设高度角为 5° 时, 映射到倾斜路径的误差为 12 mm, 这将会引起约 2.4 mm 的测站高程误差^[3]。图 2 中各测站三种模型气压误差均值分别为 9 hPa、6 hPa、3 hPa, 由此推算 GPT、GPT2、S_VMF1 三种模型气压误差引起的测站高程误差分别为 2 mm、1.5 mm、0.8 mm。

3.2 天顶静力学延迟分量

先采用 GPT 和 GPT2 两种模型计算了有气象数据的 22 个测站 2012 年全年单日气压值, 然后计算各测站的对流层天顶方向静力学延迟分量, 计算模型采用 Saastamoinen 公

式^[14]:

$$z_h(h) = \frac{0.002\ 276\ 8p}{1 - 0.002\ 66 \cos(2\varphi) - 0.28 \times 10^{-6}h}, \quad (5)$$

式中 h 以 m 为单位, p 以 kPa 为单位。

从官方网站提供的 S_VMF1 数据文件中读取各测站单日 0 时刻 (0 UTC) 天顶静力学延迟分量, 分别比较 GPT 和 GPT2 干分量与 VMF1 干分量之差, 结果见图 3。

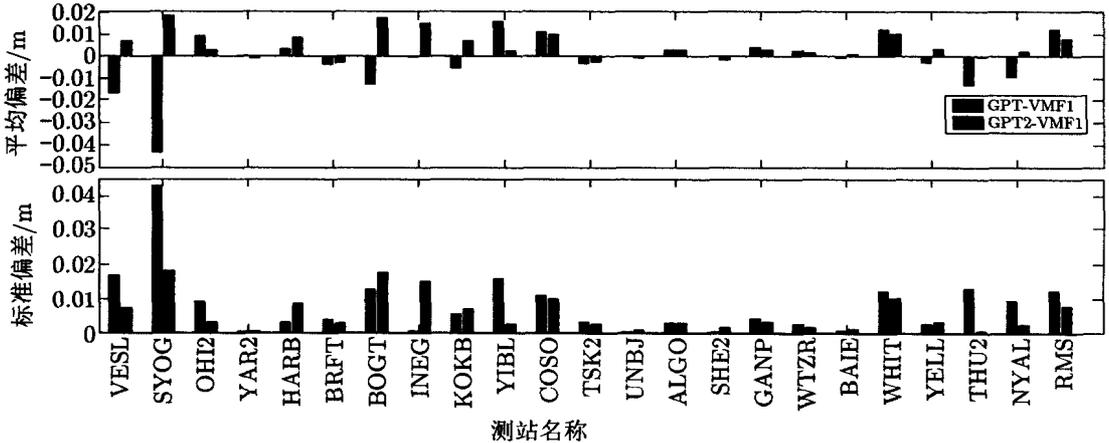


图 3 2012 年 GPT 和 GPT2 模型单日天顶干分量与 VMF1 单日天顶干分量之差均值与中误差

从图 3 可以看出, GPT 和 GPT2 两模型对流层天顶静力学延迟分量与 S_VMF1 天顶干分量之差的均值和中误差基本都在 1 cm 左右, GPT2 模型精度高于 GPT 模型。在高度截止角为 5° 时, 1 cm 的天顶干分量误差引起的倾斜方向映射误差约为 6 mm, 相应的测站高程误差约为 1.2 mm, 天顶总延迟量 ZTD 误差约为 0.4 mm, 而测站的水平方向误差将更小。比较 GPT 和 GPT2 模型各测站 2012 年全年静力学延迟分量之差均值和中误差, 除 SYOG 偏差较大外 (约 6 cm), 其他各站均值和中误差都在 1 cm 左右, 所有测站的均值为 1 cm, 中误差均值为 7 mm, 对应的测站高程方向误差约为 1 mm。

3.3 投影函数参数

GPT2 模型也提供映射函数的参数 a_h , a_w 。Kouba 等人的研究表明^[2]: 在高度截止角为 5° 时, 假定天顶静力学延迟分量为 2 m, 湿延迟为 0.2 m, 采用 S_VMF1 映射函数, 如果干映射函数参数 a_h 误差为 δa_h , 则相应的倾斜干分量误差约为 $3 \text{ mm} \times 10^6 \delta a_h$; 同理, 如果湿映射函数参数 a_w 误差为 δa_w , 相应的倾斜湿分量误差约为 $3 \text{ mm} \times 10^5 \delta a_w$ 。

为简明起见, 利用 GPT2 模型计算了 9 个 IGS 测站 2012 年全年的干、湿映射函数参数 a_h , a_w , 测站分布见图 1。将计算结果与 S_VMF1 数据文件比较, 结果见图 4。

由图 4 可以看出, GPT2 模型与 S_VMF1 模型的干、湿映射函数参数 a_h , a_w 之差的中误差分别为 1×10^{-5} 和 5×10^{-5} , 5° 高度角相应的倾斜方向干、湿延迟误差为 3 cm、1.5 cm。因此, 在高度截止角为 5° 时, 相对于 S_VMF1 模型, GPT2 模型的干、湿映射函数参数误差引起的测站高程误差约为 7 mm、4 mm。

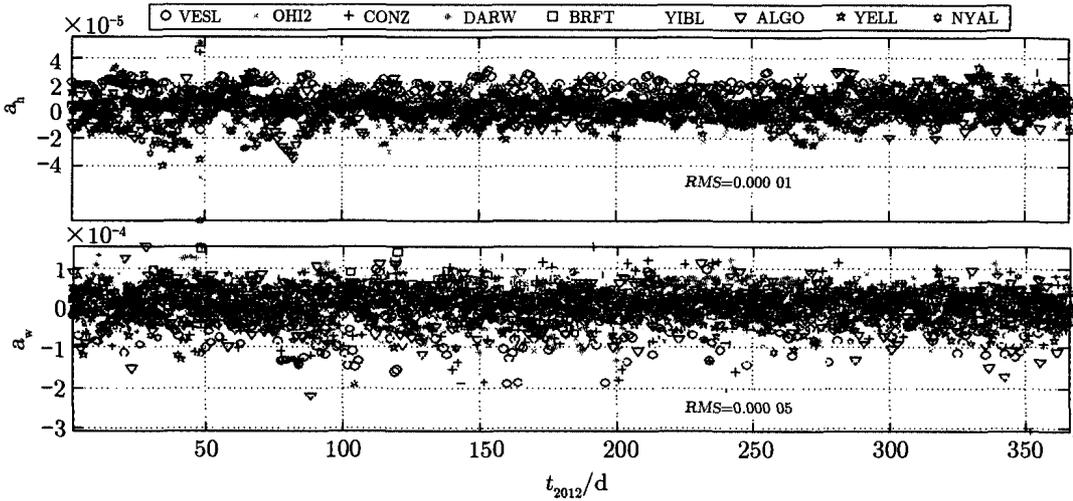


图 4 GPT2 计算的 VMF1 映射函数参数 (a_h , a_w) 与 VMF1 直接计算的参数比较

4 采用不同模型的 PPP 结果分析

分别采用三种对流层延迟模型, 利用精密定位软件 LTW_BS 对所有 30 个测站 2012 年全年 GPS 观测数据进行静态精密单点定位, 对流层模型分别采用 NMF/GPT、GMF/GPT、VMF1/GPT2, 测站分布见图 1。LTW_BS 采用最小二乘算法进行 PPP, 解算参数包括测站坐标、接收机钟差、对流层延迟、模糊度参数。定位解算时采用了上海天文台 GNSS 分析中心 (GNSS Analysis Center at Shanghai Astronomical Observatory, SHAO) 提供的精密 GPS 轨道和钟差产品^[15], 目前 SHAO 所提供的产品与 IGS 一致^[16], 其中 GPS 轨道精度约为 1.4 cm, GPS 钟差精度约为 41 ps。对流层估计中, 固定对流层静力学延迟分量, 解算湿分量, 且认为对流层天顶延迟量在 2 h 内不变。将计算的 WGS84 坐标系下测站坐标转换为站心地平坐标, 然后分别比较各模型坐标与 IGS08 框架下的测站坐标差别以及各模型的全年坐标重复率, 最后把欧洲定轨中心 (The Center for Orbit Determination in Europe, CODE) 提供的 ZTD 为视为真值, 比较各模型计算的 ZTD 误差。

4.1 各模型的 PPP 结果与 IGS08 比较

将采用三种模型计算的 PPP 结果分别与 IGS08 框架下的测站坐标进行比较, 结果见表 2。由于部分测站不是 IGS08 的基准站, 因此表 2 中只列出 10 个测站的比较结果。表 2 中分别是 2012 年三种模型的 PPP 单日解坐标分量与 IGS08 单日坐标分量之差的均值以及标准偏差 Std, 其中, IGS08 单日坐标采用 2005.0 历元时刻的坐标附加测站速度改正, 归化到 2012 年的单日坐标值; 表 2 还统计了所有测站与 IGS08 坐标差的平均值及其 Std。

由表 2 可以看出, 采用 NMF/GPT、GMF/GPT、VMF1/GPT2 三种模型的 PPP 结果, 在水平方向坐标精度相当, 高程方向后两模型精度都高于 NMF/GPT 模型, 精度提高约

表 2 采用三种模型 PPP 坐标与 IGS08 坐标比较的平均值与中误差

IGS Name	PPP(NMF/GPT)-IGS08			PPP(GMF/GPT)-IGS08			PPP(VMF1/GPT2)-IGS08			mm
	N	E	U	N	E	U	N	E	U	
VESTL	-3.2±3.0	-1.0±3.6	-13.1±13.7	-3.1±2.8	-1.2±3.5	-3.0±12.5	-3.1±2.8	-1.2±3.5	-4.8±12.3	
SYOG	-1.6±3.0	-0.5±3.5	-13.0±9.5	-1.6±2.8	-0.5±3.5	-4.8±8.9	-1.6±2.8	-0.5±3.5	-8.5±8.7	
HARB	-2.8±8.4	-0.7±3.7	1.7±40.6	-2.3±2.9	1.2±4.5	0.7±12.3	-2.3±2.9	1.2±4.5	-0.5±12.3	
BOGT	-6.8±6.5	0.3±10.7	19.2±11.8	-6.6±3.4	-0.2±5.5	18.3±11.0	-6.7±3.4	-0.2±5.5	17.0±11.0	
KOKB	1.7±2.9	-0.4±7.9	-3.1±8.1	1.7±2.8	-0.8±4.7	-3.3±7.8	1.7±2.8	-0.8±4.7	-4.3±7.8	
ALGO	-0.4±6.4	-2.4±4.7	-5.1±8.8	-0.1±3.0	-2.4±4.4	-4.0±8.4	-0.1±3.0	-2.4±4.4	-3.8±8.4	
WTZR	0.5±13.1	5.3±10.6	-12.1±27.6	0.5±13.1	5.3±10.6	-11.9±27.7	0.5±13.1	5.3±10.6	-11.4±27.6	
WHIT	2.4±10.0	2.0±13.4	-3.5±14.9	2.4±9.9	2.0±13.4	-3.4±14.8	2.4±9.9	2.0±13.4	-3.3±14.9	
YELL	-1.3±3.9	-1.5±6.6	-0.3±11.5	-1.2±3.7	-1.7±6.3	0.6±10.9	-1.2±3.7	-1.7±6.4	0.0±10.9	
NYAL	-1.9±4.5	1.7±4.3	-5.9±12.2	-1.9±4.4	1.7±4.1	-3.6±11.1	-1.9±4.3	1.7±4.1	-4.5±10.9	
RMS	2.8±7.0	2.1±14.0	9.7±18.6	2.8±6.0	2.2±6.8	7.5±13.7	2.8±6.0	2.2±6.8	7.6±13.6	

注:表中最后一行 RMS 表示所在列的均方根误差。

22%。由于 NMF/GPT、GMF/GPT 模型中气象模型相同而映射函数不同, 由此可知 GMF 映射函数能明显提高 PPP 坐标解算精度。

GMF/GPT、VMF1/GPT2 模型的 PPP 结果精度相当。在高纬度测站如 VESL、SYOG、NYAL 上两种模型之间差别比较大, GMF/GPT 模型精度要明显好于 VMF1/GPT2 模型。考虑到大多数测站两种模型精度相差不大, 而且 IGS08 综合了多个分析中心的结果, 每个分析中心采用的对流层模型都不一样, 因此可能存在模型误差。为更好地比较三种模型对 PPP 的精度影响, 下面将分析测站的坐标分量重复率。

4.2 各模型 PPP 结果的坐标分量重复率比较

将基于三种模型 PPP 计算的 2012 年全年的测站坐标分量进行线性拟合, 计算考虑全年线性变化后的测站坐标分量重复率, PPP(GMF/GPT) 坐标重复率相对于 PPP(NMF/GPT) 坐标重复率改善幅度见图 5。

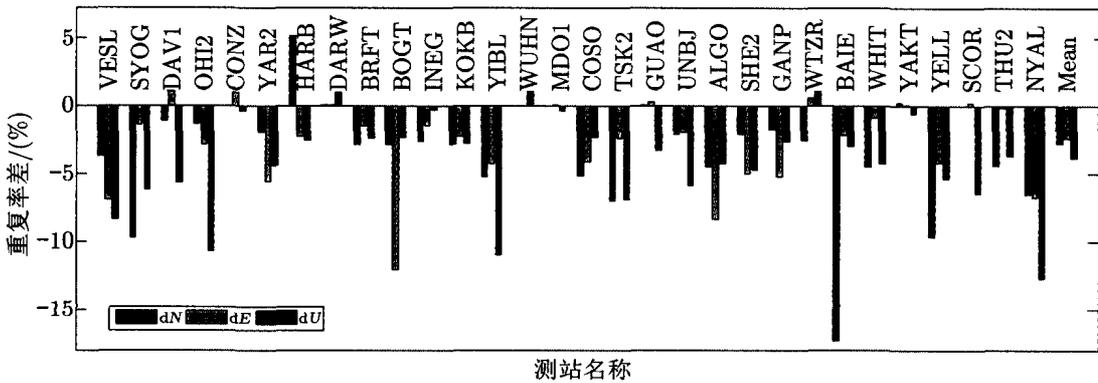


图 5 GMF/GPT 与 NMF/GPT 模型之间坐标分量重复率之差

从图 5 可以看出, 相对于 NMF/GPT 模型, 采用 GMF/GPT 模型的 PPP 坐标分量重复率在 *N*、*E*、*U* 方向都改善了约 4%, 即 GMF/GPT 模型比 NMF 模型定位精度提高约 4%。GMF/GPT 和 VMF1/GPT2 模型 PPP 水平方向坐标分量重复率差别很小, 30 个测站中有 28 个测站的差别小于 0.05%, 只有 DAV1、NYAL 测站在 *N*、*E* 方向 VMF1/GPT2 的坐标分量重复率比 GMF/GPT 模型分别高 1.3%、1.2%。为了简明表示, 图 6 只给出了高程方向两种模型的坐标分量重复率之差。可以看出, 两种模型的高程方向重复率差别比较小, 30 个测站的统计结果显示, *U* 方向两种模型的 PPP 坐标重复率差别小于 0.5%。

4.3 与 CODE 提供的 ZTD 比较

瑞士 Bern 大学天文研究所 CODE 分析中心采用 Bernese 5.1 软件处理全球 GNSS 观测数据, 其对对流层延迟解算采用 VMF 模型, 固定天顶延迟干分量解算湿分量, 数据采样间隔取为 180 s, 高度截止角取为 3°, 对流层设置为 2 h 内不变。比较采用三种模型进行 PPP 计算的对流层天顶延迟与 CODE 提供的结果进行比较, 见表 3。从表中可以看出, GMF/GPT 和 VMF1/GPT2 模型 PPP 解的 ZTD 值精度高于 NMF 模型, 在南半球尤为明显, 这是由

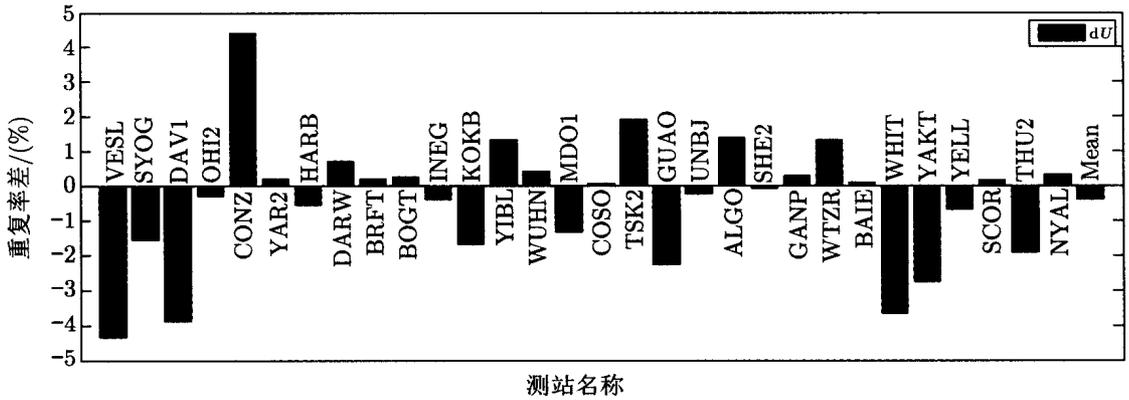


图 6 VMF1/GPT2 与 GMF/GPT 模型在高程方向坐标重复率之差

于 NMF 模型的建立只采用了北半球的观测数据；而 GMF/GPT 与 VMF1/GPT2 两模型差别很小，可以认为精度相当。

表 3 不同模型与 CODE 提供的 ZTD 比较 mm

IGS Name	NMF/GPT	GMF/GPT	VMF1/GPT2
BOGT	-1.8±17.4	-1.3±17.3	-0.6±17.3
KOKB	-1.5±11.5	-1.5±11.5	-0.9±11.5
UNBJ	-0.5±11.9	-1.3±11.9	-1.5±11.8
ALGO	-0.7±10.6	-1.3±10.5	-1.4±10.5
GANP	-0.6±8.8	-0.8±8.8	-0.8±8.8
WTZR	-0.2±7.2	-0.3±7.2	-0.6±7.2
WHIT	-0.2±7.4	-0.2±7.3	-0.2±7.3
YELL	-0.8±7.7	-1.0±7.6	-0.8±7.6
THU2	-0.3±8.3	-2.2±8.3	-1.5±8.3
RMS_N	0.9±10.5	1.2±10.5	1.0±10.5
VESL	3.7±9.5	-0.9±9.4	-0.2±9.4
SYOG	6.2±11.7	2.0±11.6	4.0±11.6
OHI2	4.9±10.8	2.3±10.5	1.8±10.5
YAR2	3.5±8.0	2.8±8.0	3.2±8.1
HARB	0.8±11.6	0.6±11.4	1.3±11.4
BRFT	1.2±20.6	1.6±20.6	2.1±20.6
RMS_S	3.9±12.7	1.9±12.6	2.4±12.6

注：表中 RMS_S 与 RMS_N 表示南北半球测站均方根误差。

5 结 语

本文介绍了三种常用的对流层模型 (NMF、GMF/GPT、VMF1) 和一种新的模型 (GPT2), 然后分析比较了各种模型之间的差异, 并通过精密单点定位比较了各种模型对定位精度的影响。通过文中的分析比较我们可以得出以下结论: (1) 就气压参数而言, VMF1 模型相对于实测气压中误差小于 0.4%, 新模型 GPT2 比 GPT 模型精度改善了约 25%; (2) 与 VMF1 模型相比, GPT 和 GPT2 模型的天顶干分量中误差都在 1 cm 左右, GPT2 精度略好于 GPT; (3) 相对于 VMF1 公布的格网模型, GPT2 模型干、湿映射函数参数 a_h , a_w 中误差约为 1×10^{-5} 和 5×10^{-5} , 在 5° 高度截止角时产生的高程方向误差分别 7 mm 和 4 mm; (4) 在 IGS08 坐标框架下, VMF1/GPT2 和 GMF/GPT 模型定位精度都比 NMF 模型有明显的改善, U 方向精度提高 22%, 就坐标重复率来讲, VMF1/GPT2 与 GMF/GPT 模型精度相当, 两者均优于 NMF/GPT 模型; (5) GMF/GPT 模型与 VMF1/GPT2 模型解算的 ZTD 精度相当, 两者精度都高于 NMF 模型, 在南半球尤为明显。

参考文献:

- [1] 刘大杰, 施一民, 过静珺. 上海: 同济大学出版社, 2003: 5
- [2] Kouba J. *Journal of Geodesy*, 2008, 82: 193
- [3] Boehm J, Werl B, Schuh H. *Journal of Geophysical Research*. 2006, 111: B02406
- [4] 王解先, 陈俊平. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2011, 39(5): 764
- [5] Niell A. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 3227
- [6] 张双成, 叶世榕, 刘经南, 等. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2009, 34: 280
- [7] Boehm J, Schuh H. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L01603
- [8] Boehm J, Niell A, Tregoning P, et al. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L07304
- [9] Boehm J, Heinkelmann R, Schuh H. *Journal of Geodesy*, 2007, 81: 679
- [10] Kouba J. *Journal of Geodesy*, 2009, 83: 199
- [11] Steigenberger P, Boehm J, Tesmer V. *Journal of Geodesy*, 2009, 83: 943
- [12] Boehm J, Lagler K, Schindelegger M, et al. <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/SOURCE/>, 2014
- [13] Lagler K, Schindelegger M, Boehm J, et al. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40: 1069
- [14] Saastamoinen J. *Bulletin géodésique*, 1973, 107: 13
- [15] Chen J P, Wu B, Hu X G, et al. *Proceedings-3rd China Satellite Navigation Conference, China: CSNC*, 2012: 213
- [16] Chen J P, Zhang Y Z, Zhou X H, et al. *SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy*, 2013, 56: 1

Analysis of Tropospheric Propagation Delay Mapping Function Models in GNSS

WANG Jun-gang^{1,2}, CHEN Jun-ping², WANG Jie-xian^{1,2,3}

(1. College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 3. Key Laboratory of Advanced Engineering Surveying of National Administration of Surveying, Mapping and Geo-Information, Shanghai 200092, China)

Abstract: Three models frequently used within the IGS for tropospheric propagation delay estimation including NMF, GMF/GPT, VMF1, and the newly-developed model GPT2 are presented in this paper. These models are compared in two scenarios: pressure, hydrostatic zenith delay and mapping function coefficients from different models were compared directly; coordinates and tropospheric parameters from the Precise Point Position (PPP) solutions based on different models using 1 year data of 30 global distributed IGS stations were compared. Results show: (1) Compared to the measured true pressure, VMF1 is the most accurate modeling more than 99.6% of pressure and the accuracy of GPT2 is improved by 25% over GPT; (2) Compared to the VMF1-HT model estimates, the RMS of hydrostatic zenith delay is 1 cm for both GPT and GPT2, and GPT2 is better than GPT; (3) Compared to the daily site VMF1 data, the RMS of mapping function coefficients a_h and a_w of GPT2 are 1×10^{-5} and 5×10^{-5} , respectively; (4) Considering the coordinates from IGS08 frame as true values, estimated coordinates using GMF/GPT or VMF1/GPT2 have an improvement of 22% than NMF; (5) The PPP ZTD estimates using GMF/GPT and VMF1/GPT2 model are more accurate than NMF.

Key words: tropospheric propagation delay; mapping function; precise point position; GPS