

融合对流层模型及其在精密单点定位中的应用

蔡舒^{1,2,3}, 劳源基^{1,2,3}, 李孟恒^{1,2,3}, 覃团发^{1,2,3}

(1. 广西大学 计算机与电子信息学院, 南宁 530004;

2. 广西多媒体通信与网络技术重点实验室, 南宁 530004;

3. 广西高校多媒体通信与信息处理重点实验室, 南宁 530004)

摘要: 受实测气象参数的限制, 使用标准大气参数的传统对流层模型的精度并不高; 使用参数估计法的精密对流层模型增加了观测方程的待估参数, 影响收敛速度. 针对实测气象参数缺失的情况, 提出一种融合对流层模型, 使用两种非实测气象参数模型分别计算出平均海平面处和测站处的气象参数, 再利用 Saastamoinen 模型经验公式求解天顶对流层延迟 (ZTD). 利用 RTKLIB 软件进行精密单点定位 (PPP) 实验. 提出的融合对流层模型摆脱了实测气象参数的限制, 解算结果表明: 使用该模型时, 在东、北、天方向的定位精度分别比 Saastamoinen 模型提高 16 mm、1 mm、2.2 mm, 比 MOPS 模型提高 13.8 mm、0.7 mm、1.6 mm, 比 GPT/UNB3m+Sa 模型提高 2.9 mm、0.4 mm、0.7 mm, 在天、北方向的定位精度接近参数估计模型, 实现了 PPP 定位精度的提高.

关键词: 对流层模型; 气象参数; RTKLIB; 精密单点定位; 定位精度

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2020)06-0046-09

0 引言

经过对流层时, 电磁波信号会受到大气折射的影响, 出现对流层延迟^[1-2]. 对流层延迟属于传播路径相关的误差, 在全球卫星导航系统 (GNSS) 中是影响定位精度的主要误差来源之一^[3]. 通常, 天顶方向的对流层延迟量最小为 2 m 左右; 而高度角接近 0 时, 对流层延迟可能超过 20 m^[4]. 天顶对流层延迟 (ZTD) 易于建模和计算, 利用映射函数可以实现实际路径上的对流层延迟与 ZTD 的转化, 因此目前的研究一般利用 ZTD 得到实际路径的对流层延迟^[5]. 由于对流层气体成分复杂, 研究者一般将对流层延迟划分成干延迟和湿延迟分量^[6].

对流层延迟修正模型, 简称对流层模型, 通常根据是否需要实际测量的气象参数而分为两类, 即实测气象参数模型和非实测气象参数模型. Saastamoinen^[7] 于 1973 年建立了 Saastamoinen 对流层模型. MOPS 模型是无线电航空技术委员会

(RTCA) 推荐使用的一类对流层模型, RTCA 建议将 0.12 m 的标准差作为对流层顶最大误差^[8]. K. Lagler 等在全球温压 (GPT) 模型的基础上建立了 GPT2 模型, 随后 Johannes Böhm 等通过改善水汽压的精度, 提出了全球温压湿 (GPT2w) 模型, 格网划分更为细致, 包括 $5^\circ \times 5^\circ$ 和 $1^\circ \times 1^\circ$ 两种, 气象参数更丰富, 利用该模型可估计出目标地点的气象参数, 利用气象参数计算 ZTD, 修正精度可达厘米级, 是目前完全公开的气象模型中精度最高的模型^[9-11]. 同时, 国内学者也对对流层修正模型进行了分析研究. 为了避免受到实际测量气象数据的限制, 文献[12]提出了一种 GPT/UNB3m+Sa 模型. 求干延迟需要气压参数, 文献[12]使用 GPT 模型计算, 本文使用 MOPS 模型计算, 一般来说, 对流层干延迟比较稳定, 模型法计算出的干延迟量相差较小. 而对流层中水汽变化剧烈, 对湿延迟影响较大, 用于计算湿延迟的气象参数越精确, 获取的对流层延迟量精度越高. 求湿延迟需要温度和和

收稿日期: 2020-07-01

资助项目: 国家自然科学基金 (61563004)

通信作者: 覃团发 E-mail: tfqin@gxu.edu.cn

气压参数,文献[12]使用 GPT 模型计算温度,使用 UNB3m 模型计算水汽压;本文使用高精度的 GPT2w 模型计算温度和水汽压,获得的对流层延迟量将更精确. 文献[13]基于传统对流层模型设计了 GPT2+Saas 模型,为对流层建模提供了新思路. 文献[14]证明了 GPT2w 模型效果优于 EGNOS 和 UNB3m 模型. 文献[15]利用 BP 神经网络技术改进了 GPT2w 模型. 文献[16]参考探空站评价 GPT2w 模型,推荐使用分辨率为 1° 的模型.

RTKLIB 是一款开源 GNSS 软件包,配备了多种 GNSS 的误差模型,能够实现单点定位、载波相位定位以及 PPP. Takács 等^[17]将增强定位模式计算合并到较新的 RTKLIB 版本中,并将其更紧密地集成到原始 RTKLIB 实用程序 RNX2RTKP 中. Romero-Andrade 等^[18]证明了 RTKLIB 软件在嵌入式系统的可靠性. Li^[19]在 RTKLIB 上实现了实时的精密单点定位. 精密单点定位(PPP)技术能够为静态定位提供厘米级甚至毫米级的定位精度^[20]. 随着卫星导航技术的发展,用户对 PPP 的要求越来越高,因此如何减少对流层延迟对定位精度的影响、平衡收敛速度与定位精度,一直是 PPP 技术研究的重点之一. 目前对 RTKLIB 的研究大多集中在定位算法、数据处理方面,对误差修正模型的研究并不多. 在获得实测气象参数的情况下,Saastamoinen 模型对于干延迟的求解精度极高,但是在实际工程应用中,实时气象探测对仪器设备的要求较高,导致该类方法的普适性受到限制. 在缺失实测气象参数时,使用标准大气的模型修正法精度较低,且很难做到获得全球任意地点的实测气象参数. PPP 解算中,使用模型法时待估参数包括三维坐标、接收机钟差、整周模糊度;使用参数估计法“Estimate ZTD+Grad”时,额外增加了对流层延迟、北向梯度、东向梯度三个待估参数,增加了计算复杂度.

针对实测气象参数缺失的情况,本文提出了一种新型融合对流层模型,并基于该模型提出一种基于 RTKLIB 的新型静态 PPP 后处理方案. 最后进行 RTKLIB PPP 解算,并与传统的对流层模型和高精度的参数估计模型进行对比分析,结果表明,基于本文提出的后处理方案可以实现厘米级到毫米级的静态定位精度,定位精度优于使用传统对流层模型,且在北和天方向的定位精度与使用参数估计模型较为接近,实现了缺失实测气象参数时

PPP 定位精度的提高.

1 对流层模型及原理

Saastamoinen 模型属于实测气象参数模型, MOPS 模型和 GPT2w 模型属于非实测气象参数模型, RTKLIB 中的精密对流层模型“Estimate ZTD+Grad”(估计天顶对流层延迟和梯度)使用了参数估计法.

1.1 Saastamoinen 模型

在缺失实测气象参数时, Saastamoinen 模型使用标准大气作为平均海平面处的气象参数,之后利用高程修正公式,求出测站处的气象参数,然后代入经验公式求解 ZTD^[21]. 在 RTKLIB 中,采用了 NMF 映射函数以求得最终实际路径上的对流层延迟^[22].

高程修正公式为

$$\begin{cases} T = T_0 - 0.0068H \\ P = P_0 \left(1 - \frac{0.0068}{T_0}H\right)^5 \\ e = e_0 \left(1 - \frac{0.0068}{T_0}H\right)^4 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: H 表示测站的高程;地表气象参数取值分别为 $T_0 = 288.15$ K、 $P_0 = 1\,013.25$ mbar、 $e_0 = 11.691$ mbar; T 、 P 、 e 分别表示测站处的温度、气压、水汽压.

Saastamoinen 模型为

$$ZHD = 0.002277 \frac{P}{f(\varphi, H)}, \quad (2)$$

$$ZWD = 0.002277 \left(0.05 + \frac{1255}{T}\right) \frac{e}{f(\varphi, H)}. \quad (3)$$

式中: φ 是待测点的纬度; $f(\varphi, h)$ 是地球自转引起的重力加速度的修正; ZHD 和 ZWD 分别表示天顶对流层干延迟和天顶对流层湿延迟.

1.2 MOPS 模型

MOPS 模型^[23-24] 求解 ZHD 、 ZWD , 需要利用接收机的高度和五个气象参数. 气象参数分别是:气压 P 、温度 T 、水汽压 e 、温度衰减率 β 和水汽衰减率 λ . MOPS 模型提供了气象参数年平均值和年变化量的统计表,对纬度为 φ 且年积日为 doy 的测站,可通过内插法求出平均海平面处的气象参数,每一个气象参数 q 的计算公式如下

$$q(\varphi, doy) = q_0(\varphi) - \Delta q(\varphi) \cdot \cos\left(\frac{2\pi(doy - doy_{min})}{365.25}\right). \quad (4)$$

式中: doy_{\min} 在北半球是 28, 在南半球是 211; q_0 和 Δq 是接收机所处纬度对应某一参数的年平均值和年变化值. 当纬度为 $|\varphi| \leq 15^\circ$ 或 $|\varphi| \geq 75^\circ$ 时, q_0 和 Δq 值直接取自 MOPS 模型提供的参数表; 当纬度为 $15^\circ < |\varphi| < 75^\circ$ 时, q_0 和 Δq 值均是由两个最近的纬度 φ_i, φ_{i+1} 对应的参数内插得到. 由内插公式得

$$q(\varphi, doy) = q_0(\varphi_i) + [q_0(\varphi_{i+1}) - q_0(\varphi_i)] \cdot \frac{(\varphi - \varphi_i)}{(\varphi_{i+1} - \varphi_i)} - \left\{ \Delta q(\varphi_i) + [\Delta q(\varphi_{i+1}) - \Delta q(\varphi_i)] \cdot \frac{(\varphi - \varphi_i)}{(\varphi_{i+1} - \varphi_i)} \right\} \times \cos\left(2\pi \frac{doy - doy_{\min}}{365.25}\right). \quad (5)$$

平均海平面处的天顶对流层延迟计算公式为:

$$ZHD_0 = \frac{10^{-6} k_1 R_d P}{g_m}, \quad (6)$$

$$ZWD_0 = \frac{10^{-6} k_2 R_d}{g_m(\lambda + 1) - \beta R_d} \cdot \frac{e}{T}. \quad (7)$$

式中: 常系数 k_1 为 77.604 K/mbar, k_2 为 382 000 K²/mbar; g_m 为 9.784 m/s²; 干气体常数 R_d 为 287.054 J/(kg · K).

1.3 GPT2w 模型

GPT2w 模型^[4] 给出了气象参数表 grd 文件. 输入测站坐标和简化儒略日, 可求得地表格网点处的气象参数, 包括温度 T_0 及其衰减率 β_T 、比湿度 Q 、气压 P_0 、水汽压 e_0 、水汽压衰减因子 λ 、加权平均温度 T_m . 根据格网文件求地表格网处各气象参数的公式为

$$q(t) = A_0 + A_1 \cos\left(\frac{doy}{365.25} 2\pi\right) + B_1 \sin\left(\frac{doy}{365.25} 2\pi\right) + A_2 \cos\left(\frac{doy}{365.25} 4\pi\right) + B_2 \left(\frac{doy}{365.25} 4\pi\right). \quad (8)$$

式中: A_0 是年平均值; A_1, B_1 是年振幅; A_2, B_2 是半年振幅; e_0 和中间参数虚温 T_v 分别是:

$$e_0 = \frac{Q \cdot P_0}{(0.622 + 0.378 \cdot Q)}, \quad (9)$$

$$T_v = T_0(1 + 0.6077 \cdot Q). \quad (10)$$

之后根据高程修正公式求出高度为 H 处的格网的气象参数:

$$\begin{cases} P = P_0 \cdot e^{\frac{-g_m \cdot M_0}{k_g \cdot T_v} (H - H_0)} \\ T = T_0 + \beta_T \cdot (H - H_0) \\ e = e_0 \left(\frac{P \cdot 100}{P_0}\right)^{\lambda+1} \end{cases}. \quad (11)$$

式中: H 和 H_0 分别表示测站高度和格网点高度; 气体相关常数 $M_0 = 28.965 \times 10^{-3}$ kg/mol, $k_g = 8.314$ J/(K · mol).

高程修正后进行双线性插值计算出测站处的气象参数.

2 融合对流层模型算法

RTKLIB 软件包中配置了 MOPS 模型和 Saastamoinen 模型, 本文额外引入 GPT2w 模型, 从而提出一种新的融合对流层模型, 简记为 MOG-Sa 模型.

2.1 MOG-Sa 模型的算法流程

当没有实测气象参数时, Saastamoinen 模型通常设定地表气象参数为固定值, 参数来源于标准大气海平面处的数值, 在 RTKLIB 中同样采用了这种设定. 而地表不同纬度不同年积日的气象参数不可能完全一致, 初始标准大气参数显然不够精确, 这就导致利用 RTKLIB 进行 PPP 实验时, 使用 Saastamoinen 模型的定位精度远远低于 Estimate ZTD+Grad 模型.

RTKLIB 的程序包中配置了 MOPS 模型, 可以根据测站纬度和年积日求得平均海平面处的气象参数, 与标准大气相比, 更接近实际气象参数. 在缺失实测气象数据时, 考虑利用 RTKLIB 自带的 MOPS 模型提供海平面处的气象参数. 另外, 针对对流层大气水汽变化剧烈, 湿延迟难以精确估计的问题, 引入分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 GPT2w 模型, 该模型作为目前精度最高的气象参数计算模型, 可以计算出测站处的温度和水汽压. 最后分别将气象参数传入 Saastamoinen 模型经验公式, 求解 ZTD.

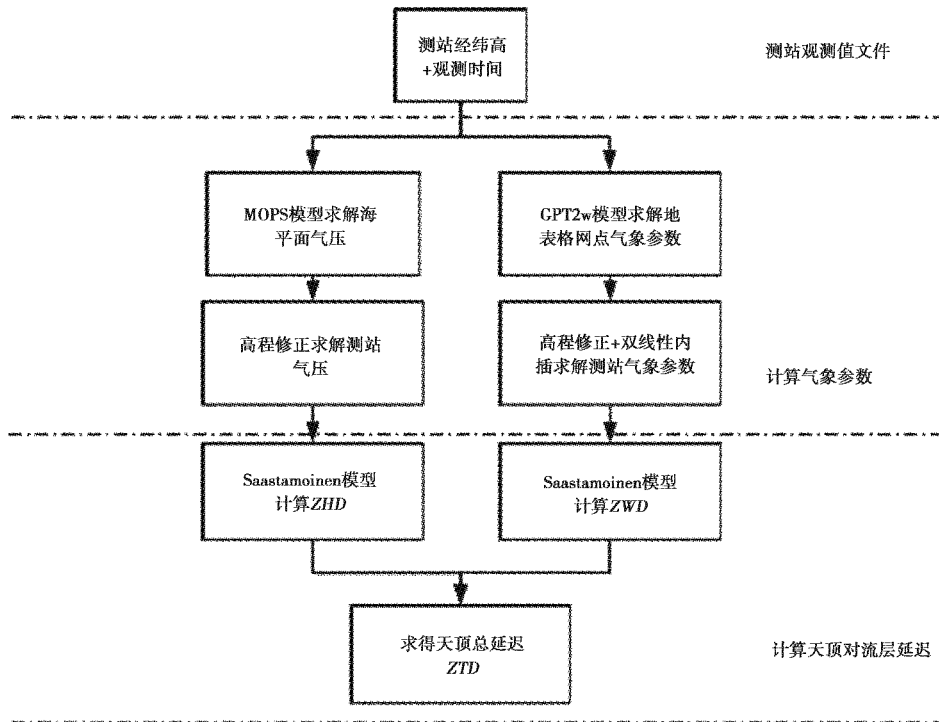


图 1 融合对流层模型(MOG-Sa)的算法流程

MOG-Sa 模型求解 ZTD 的流程如图 1 所示. 首先利用 MOPS 模型求出平均海平面处的气压, 将其作为初始气象参数, 高程修正后得到测站处的气压. 同时使用 GPT2w 模型求出测站处的气压和温度, 具体步骤为: 通过查表获得测站投影周围最近的四个格网点的气象参数; 然后高程修正到高程 H 处, 得到测站周围四个格网点的气象参数; 之后进行双线性插值; 最后利用 Saastamoinen 模型的经验公式分别计算出 ZHD 和 ZWD, 即可通过相应运算求出 ZTD.

2.2 MOG-Sa 模型的计算过程

1) 输入卫星观测值文件, 获取测站的三维坐标(经度、纬度 φ 、高程) 和年积日(doy).

2) 已知 φ 和 doy , 通过 MOPS 模型查表确定气象参数的年平均值和年变化值, 然后根据式(12), 计算出平均海平面处格网点气象参数 P_{s0} :

$$P_{s0}(\varphi, doy) = P_0(\varphi) - \Delta P_0(\varphi) \cdot \cos\left(\frac{2\pi(doy-doy_{min})}{365.25}\right). \quad (12)$$

3) 选择 Saastamoinen 模型的高程修正公式求解测站处的气象参数 P , 其中 H 是测站的高程, 计算公式为

$$P = P_{s0} \left(1 - \frac{0.0068}{T_{s0}} H\right)^5. \quad (13)$$

4) 选择分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 GPT2w 模型. 根据该模型提供的气象参数表 grd 文件, 测站投影到地表处时最近的四个格网点处的气象参数均可利用式(14)求得. 每个格网点处的气象参数均按照式(15)进行高程修正, 求得测站高程处四个格网点处的温度 $T_{g1}, T_{g2}, T_{g3}, T_{g4}$ 和水汽压 $e_{g1}, e_{g2}, e_{g3}, e_{g4}$, 最后进行双线性内插处理, 求出测站处的温度 T 和水汽压 e :

$$q(t) = A_0 + A_1 \cos\left(\frac{doy}{365.25} 2\pi\right) + B_1 \sin\left(\frac{doy}{365.25} 2\pi\right) + A_2 \cos\left(\frac{doy}{365.25} 4\pi\right) + B_2 \left(\frac{doy}{365.25} 4\pi\right), \quad (14)$$

$$\begin{cases} e_0 = \frac{Q \cdot P_0}{(0.622 + 0.378 \cdot Q) \cdot 100} \\ P = P_0 \cdot \exp\left[\frac{-g_m \cdot M_0}{k_g \cdot T_v \cdot (H - H_0)}\right] \\ T_g = T_0 + \beta_T \cdot (H - H_0) \\ e_g = e_0 \left(\frac{P \cdot 100}{P_0}\right)^{\lambda+1} \end{cases} \quad (15)$$

式中其余参数含义同前文一致.

5) 分别根据式(16)和式(17)求解天顶干延

迟和天顶湿延迟:

$$ZHD = 0.002277 \cdot$$

$$\frac{P}{1 - 0.00266 \cos 2\varphi - 0.00028H}, \quad (16)$$

$$ZWD = 0.002277 \left(0.05 + \frac{1255}{T} \right) \cdot$$

$$\frac{e}{1 - 0.00266 \cos 2\varphi - 0.00028H}. \quad (17)$$

之后用户可根据实际需要,选择映射函数,求解实际路径上的对流层延迟 T_D . RTKLIB 默认选择 NMF 映射函数模型, T_D 的求解公式如下

$$T_D = ZHD \cdot m_h(el) + ZWD \cdot m_w(el). \quad (18)$$

式中, $m_h(el)$ 、 $m_w(el)$ 分别是 NMF 模型的干映射函数和湿映射函数, el 是高度角.

3 算例分析

基于 RTKLIB 的 PPP 后处理功能,将提出的融合对流层模型添加进 RTKLIB 中,从而提出一

种新型的 RTKLIB 静态 PPP 后处理方案,另外设置对照组 Saastamoinen 模型、MOPS 模型、Estimate ZTD+Grad 模型,在不同对流层模型下进行静态 PPP 解算实验. 在 Visual Studio2017 平台上编译 RTKLIB, PPP 解算后输出的解文件使用 MATLAB 进行计算和处理.

3.1 实验数据及 PPP 参数配置

实验的输入数据包括卫星观测值文件、广播星历、精密星历、精密钟差、天线相位中心修正等各类误差修正文件. 周跳检测是通过失锁标识符和无几何函数组合进行的. 各项误差修正后,使用扩展卡尔曼滤波进行参数估计. 最后,输出测站坐标文件.

考虑到地理位置分布,从 IGS 中选择了 6 个 MGEX 测站,包括 3 个中国地区的测站和 3 个国外测站. 使用 6 个 MGEX 测站在 2019 年 3 月 1 日(年积日 60)的观测值文件,测站信息如表 1 所示.

表 1 MGEX 测站位置

测站	城市	纬度/(°)	经度/(°)	高程/m
hkws	中国香港	22.434 282 40	114.335 377 30	63.789
jfng	中国武汉	30.515 555 60	114.490 833 30	71.324
lhaz	中国拉萨	29.657 330 60	91.104 022 20	3 622.000
karr	澳大利亚卡拉萨	-20.981 422 54	117.097 196 69	109.200
masl	西班牙马斯帕洛马斯	27.763 611 10	-15.633 055 60	197.300
wtzz	德国巴德克茨廷	49.144 166 70	12.878 888 90	665.890

在静态 PPP 模式下,选择 GPS L1/L2 频率,高度角设置为 15° ,选择组合滤波器,采用无电离层组合,使用国际 GNSS 服务(IGS)的 sp3 精密星历和 clk 精密钟差文件,天线相位中心修正选择 IGS 的 atx 文件.

3.2 解算结果分析

MGEX 观测值文件时长为 24 h,采样间隔为 30 s,一天共 2 880 个历元.

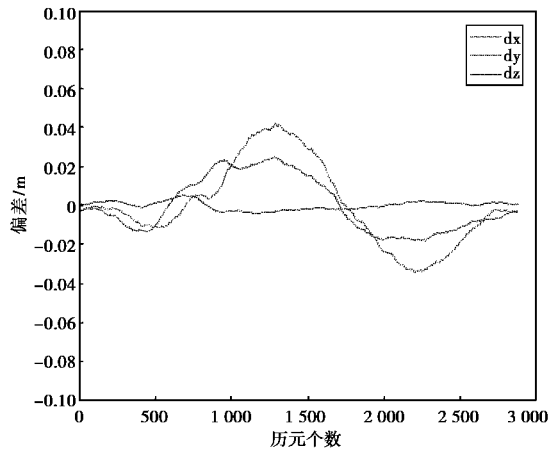
1) 单天解的偏差曲线分析

PPP 解算后默认以 ECEF-XYZ 坐标系输出,IGS 第 2 042 周的 snx 周解文件视为坐标真值. 将定位解与 snx 值作差,计算出定位解在每一历元的偏差. 以 karr 测站为例,得到五种对流层模型下定位解在 ECEF-XYZ 坐标系下的单天解定位偏差曲线,如图 2 所示.

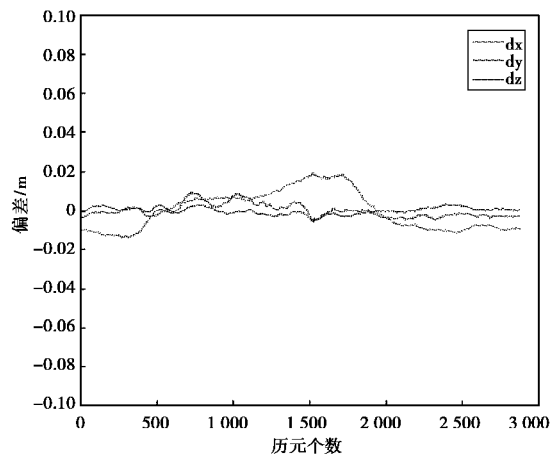
由图 2 可知, Saastamoinen 模型(图(a)) 和 MOPS 模型(图(b)) 的 PPP 解算效果极为接近;文献[12](图(c)) 和 MOG-Sa 模型(图(d)) 的 PPP 解

算效果在各方向上均优于前两者,尤其是在 X 和 Y 方向,误差更小,单天解更稳定,MOG-Sa 模型对应的收敛曲线比文献[12]更平滑;与 Estimate ZTD+Grad 模型(图(e)) 相比,在 Y、Z 方向比较接近,在 X 方向还有一定的差距. 另外,所有偏差曲线在一天中波动较大时所处的历元基本一致,这可能跟测站当天的气候状况有关.

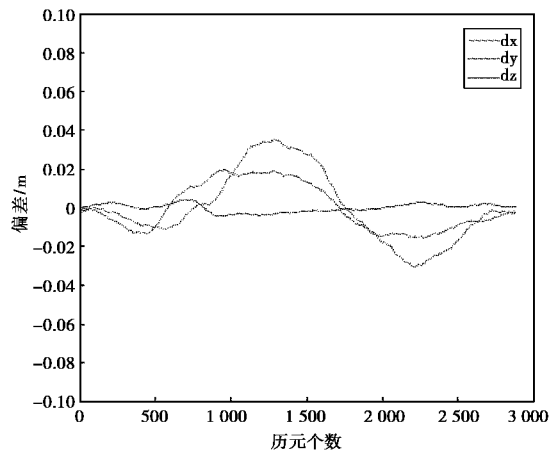
对比各方向,在 X 方向,各偏差曲线均有不同程度的波动, Saastamoinen 模型和 MOPS 模型波动较大,文献[12]、MOG-Sa 模型和 Estimate ZTD+Grad 更为平滑;在 Y 方向, MOG-Sa 模型的偏差比两种传统模型和文献[12]要小且曲线比较稳定, Estimate ZTD+Grad 模型效果最好;在 Z 方向,偏差曲线都比较稳定. 总体来看, MOG-Sa 模型的 PPP 解算效果比传统的 Saastamoinen 模型和 MOPS 模型更好;与参数估计法相比还有一些差距,尤其是在 X 方向.



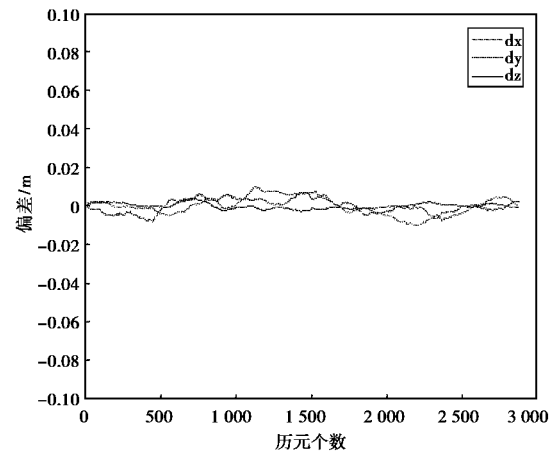
(a) Saastamoinen 模型



(d) MOG-Sa 模型

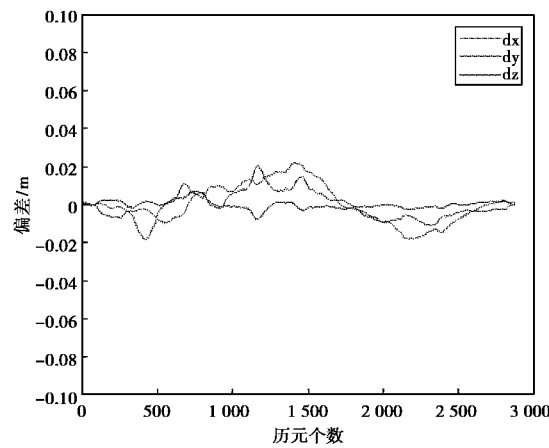


(b) MOPS 模型



(e) Estimate ZTD+Grad 模型

图 2 PPP 解算偏差曲线



(c) 文献[12]

2) 定位误差的 RMS 值分析

东北天(ENU)坐标系以用户为坐标原点,更能反映出用户接收机的位置.通常将定位误差的均方根(RMS)值作为定位精度的评估标准.仍然使用六个 MGEX 测站的 24 h 观测值文件,并将 IGS 提供的参考坐标作为真值进行 PPP 解算.

调用 RTKLIB 自带的坐标系转换函数,输出 ENU 坐标系下的定位偏差.统计出 6 个测站下使用五种对流层模型进行 PPP 解算后在 E、N、U 方向上定位误差的 RMS 值,如表 2 所示.之后统计出使用五种对流层模型进行 PPP 解算后定位误差的 RMS 均值,如图 3 所示,从解算结果整体上看,

RTKLIB PPP 解算的定位精度在 N 方向最高,其次是 U 方向,E 方向精度最低. 使用 MOG-Sa 模型的 PPP 定位精度在 N 和 U 方向可以达到毫米级,在 E 方向可以达到厘米级.

MOG-Sa 模型的定位精度在东、北、天方向上分别比 Saastamoinen 模型提高 16 mm、1 mm、2.2 mm,比 MOPS 模型提高 13.8 mm、0.7 mm、1.6 mm,比 GPT/UNB3m+Sa 模型提高 2.9 mm、0.4 mm、0.7 mm,说明使用 MOG-Sa 模型在 PPP 定位精度上有了较好的改善. 与高精度的 Estimate ZTD+Grad 模型相比,在北和天方向上的定位精度已经较为接近.

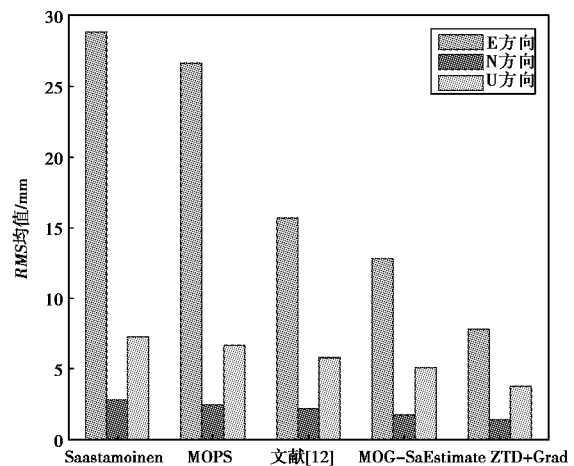


图3 PPP 定位误差的 RMS 均值/mm

表2 PPP 定位误差的 RMS 值

mm

模型	方向	测站						均值
		hkws	jfng	lhaz	karr	masl	wtzz	
Sa	E	33.6	33.7	42.4	24.5	17.1	21.3	28.8
	N	2.2	3.3	2.6	2.7	2.6	3.6	2.8
	U	8.6	10.6	5.8	5.1	6.6	6.9	7.3
MOPS	E	31.3	32.1	39.9	21.1	16.0	19.3	26.6
	N	2.1	3.1	1.7	2.5	2.1	3.5	2.5
	U	7.9	9.3	5.8	5.0	5.8	6.4	6.7
文献[12]	E	20.3	22.7	16.8	12.5	11.2	10.7	15.7
	N	1.9	2.8	1.7	2.4	1.8	2.3	2.2
	U	7.1	7.5	5.2	4.3	5.1	5.8	5.8
MOG-Sa	E	14.7	17.2	16.4	10.2	8.9	9.6	12.8
	N	1.6	2.1	1.5	1.7	1.9	2.1	1.8
	U	5.8	6.3	4.6	4.0	5.2	4.9	5.1
ZTD+Grad	E	7.9	9.9	12.5	5.2	4.7	6.7	7.8
	N	1.0	1.3	1.1	1.6	1.3	1.9	1.4
	U	4.3	4.2	3.1	2.8	4.7	3.5	3.8

4 结束语

本文提出一种新的融合对流层模型 MOG-Sa,避免了对实测气象参数的依赖,解决了缺失初始气象参数时标准大气参数不够精确的问题,同时引入了高精度气象参数模型 GPT2w,利用 GPT2w 模型提供的气象参数计算 ZWD,改善了 ZWD 精度较低的问题. 基于提出的融合对流层模型,提出了一种基于 RTKLIB 的新型 PPP 静态后处理方案,将 MOG-Sa 模型应用到 RTKLIB 的对流层处理模块中,进行静态 PPP 解算实验.

实验结果表明:与 Saastamoinen 模型、MOPS 模型、GPT/UNB3m+Sa 模型相比,使用融合对流

层模型 MOG-Sa 进行 PPP 解算的定位结果更稳定,定位精度更高,MOG-Sa 模型对应的定位精度在东、北、天方向上分别比 Saastamoinen 模型提高 16 mm、1 mm、2.2 mm,比 MOPS 模型提高 13.8 mm、0.7 mm、1.6 mm,比 GPT/UNB3m+Sa 模型提高 2.9 mm、0.4 mm、0.7 mm;与使用参数估计法的 Estimate ZTD+Grad 模型相比,在北方向和天方向的定位精度较为接近,在东方向上还有一定差距,但 MOG-Sa 模型不需将对流层延迟作为待估参数,计算更简便. 因此,MOG-Sa 模型使用方便且有效改善了传统对流层模型的定位效果,可以较好地应用于静态 PPP,实现厘米级到毫米级的定

位精度.

本文的融合对流层模型通过引入非气象参数模型扩展了模型的应用范围,提高了传统对流层模型的精度.若要进一步提高传统模型的精度,可以考虑利用神经网络、遗传算法等技术对传统模型进行误差补偿.

参考文献

- [1] RAJU C S, SAHA K, PARAMESWARAN K. Signature of atmospheric oscillations in GPS-Measured tropospheric delay[J]. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, 2009, 71(17-18): 1784-1793. DOI:10.1016/j.jastp.2009.06.011.
- [2] FERNANDES M J, LAZARO C, NUNES A L, et al. GNSS-Derived path delay: an approach to compute the wet tropospheric correction for coastal altimetry [J]. *IEEE geoscience and remote sensing letters*, 2010, 7(3): 596-600. DOI: 10.1109/LGRS.2010.2042425.
- [3] WANG N B, LI Z S, LI M, et al. GPS, BDS and Galileo ionospheric correction models: an evaluation in range delay and position domain[J]. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, 2018(170): 83-91. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.02.014.
- [4] LIU Z, CHEN X H, LIU Q. Estimating zenith tropospheric delay based on GPT2w model[J]. *IEEE access*, 2019(7): 139258-139263. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2931984.
- [5] 范昊鹏, 孙中苗, 刘晓刚, 等. 方位角对斜路径对流层延迟的影响研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2019, 39(6): 634-638.
- [6] 毛健, 崔铁军, 李晓丽, 等. 融合大气数值模式的高精度对流层天顶延迟计算方法[J]. *测绘学报*, 2019, 48(7): 862-870.
- [7] SAASTAMOINEN J. Contributions to the theory of atmospheric refraction. Part II. Refraction corrections in satellite geodesy[J]. *Bulletin géodésique*, 1973, 107(1): 13-34. DOI:10.1007/BF02522083.
- [8] JUNI I, RÓZSA S. Validation of a new model for the estimation of residual tropospheric delay error under extreme weather conditions[J]. *Periodica polytechnica civil engineering*, 2019, 63(1): 121-129. DOI: 10.3311/PPci.12132.
- [9] KOUBA J. Testing of global pressure/temperature (GPT) model and global mapping function (GMF) in GPS analyses[J]. *Journal of geodesy*, 2009, 83(3-4): 199-208. DOI:10.1007/s00190-008-0229-6.
- [10] LAGLER K, SCHINDELEGGER M, BOHM J, et al. GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques[J]. *Geophysical research letters*, 2013, 40(6): 1069-1073. DOI:10.1002/grl.50288.
- [11] BÖHM J, MÖLLER G, SCHINDELEGGER M, et al. Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w) [J]. *GPS solutions*, 2015, 19(3): 433-441. DOI: 10.1007/s10291-014-0403-7.
- [12] 杨祥, 喻国荣, 潘树国, 等. 一种综合的对流层延迟模型算法[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(增刊2): 419-423.
- [13] 姚宜斌, 张豹, 严凤, 等. 两种精化的对流层延迟改正模型[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(5): 1492-1501.
- [14] 杜晓燕, 乔江, 卫佩佩. 一种用于中国地区的对流层天顶延迟实时修正模型[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(1): 156-164.
- [15] 杨慧君, 冯克明, 谢淑香, 等. 基于BP神经网络的GPT2w改进模型及全球精度分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(3): 500-508.
- [16] 黄良珂, 李琛, 王浩宇, 等. 基于GPT2w模型计算中国地区对流层加权平均温度的精度分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2019, 39(5): 496-501.
- [17] TAKÁCS B, SIKI Z, MARKOVITS-SOMOGYI R. Extension of RTKLIB for the calculation and validation of protection levels[J]. *Remote sensing and spatial information sciences*, 2017, XLII-4(W2): 161-166. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-4-W2-161-2017.
- [18] ROMERO-ANDRADE R, ZAMORA-MACIEL A, JOSÉ DE J, et al. Comparative analysis of precise point positioning processing technique with GPS low-cost in different technologies with academic software [J]. *Measurement*, 2019(136): 337-344. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.12.100
- [19] LI Z, ZHANG JY, LI T, et al. Analysis of static and dynamic real-time precise point positioning and precision based on SSR correction[C]//2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). DOI:10.1109/cLNFa.2016.78.32151.
- [20] GAO Y, SHEN X B. A new method for carrier-phase-based precise point positioning[J]. *Annual of navigation*, 2002, 49(2): 109-116. DOI: 10.1002/j.2161-4296.2002.tb00260.x.
- [21] DAVIS J L, HERRING T A, SHAPPIRO I I, et al. Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length [J]. *Radio science*, 1985, 6(20): 1593-1607. DOI:10.1029/RS0201006P01593. Source: NTRS.

- [22] TAKASU T, YASUDA A. Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB[C]//International Symposium on GPS/GNSS, Korea, 2009: 4-6.
- [23] RTCA/DO-229C, Minimum operational performance standards for global positioning system/wide area augmentation system airborne equipment[S]. RTCA inc, 2001: A7-A9.
- [24] KOS T, BOTINČAN M, DLESK A. Estimation of MOPS/EGNOS tropospheric delay model accuracy at northern and southern latitudes[C]//Proceedings of 2nd GNSS Vulnerabilities and Solutions Conference London, 2009: 1-7.

作者简介

蔡舒 (1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为精密单点定位。

劳源基 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为北斗接收机及其应用。

李孟恒 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为北斗精密定位系统及其应用。

覃团发 (1966—), 男, 博士, 教授、博士生导师, 主要研究方向为北斗卫星导航系统、无线多媒体通信。

Fusion tropospheric model and its application in precise point positioning

CAI Shu^{1,2,3}, LAO Yuanji^{1,2,3}, LI Mengheng^{1,2,3}, QIN Tuanfa^{1,2,3}

(1. School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Multimedia Communications and Network Technology,

Nanning 530004, China; 3. Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of

Multimedia Communications and Information Processing, Nanning 530004, China)

Abstract: Limited by the measured meteorological parameters, the accuracy of the traditional tropospheric model using standard atmospheric parameters is not high. The precise tropospheric model using parameter estimation method increases the number of parameters to be estimated of the observation equation and affects the convergence rate. For the absence of measured meteorological parameters, a fusion tropospheric model is proposed. Two non-measured meteorological parameter models are used to calculate the meteorological parameters at the average sea level and at the station respectively, and then the Saastamoinen model empirical formula is used to solve the zenith tropospheric delay. Precise point positioning (PPP) experiments were performed on RTKLIB software. The proposed fusion tropospheric model is free from the limits of measured meteorological parameters. The results show that when this fusion troposphere model is used, the positioning accuracy in the east, north and up directions is improved by 16 mm, 1 mm, 2.2 mm, compared with the Saastamoinen model, respectively. And, the positioning accuracy in the east, north and up directions is improved by 13.8 mm, 0.7 mm, 1.6 mm compared with the MOPS model, respectively. The positioning accuracy in the east, north and up directions is improved by 2.9 mm, 0.4 mm, 0.7 mm compared with the GPT/UNB3m+Sa model, respectively. The positioning accuracy in the up and north direction is close to the parameter estimation model. The PPP positioning accuracy is improved by using the proposed fusion tropospheric model.

Keywords: tropospheric model; meteorological parameters; RTKLIB; precise point positioning; positioning accuracy