

一种新的区域对流层拟合模型 及其在 PPP 中的应用

姚宜斌¹ 张 瑞¹ 易文婷² 宋伟伟²

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:在分析常用的四参数曲面模型等区域对流层延迟模型的基础上,提出了一种新的基于多面函数的对流层拟合模型,并利用自编软件分析了各模型的拟合效果。将对流层拟合模型应用于改进的 PPP 定位算法,结果表明,所提方法能有效地提高初始历元的解算精度,收敛后定位结果与采用随机游走估计对流层湿延迟方法的结果精度相当。该方法可在一两个历元中使 PPP 收敛至 dm 级,但是对 PPP 收敛至 cm 级的效率提高并不明显。

关键词:对流层;拟合模型;精密单点定位;多面函数

中图法分类号:P228.41

基于广域(或全球)跟踪站网络的实时精密单点定位(PPP)服务系统已成为目前 GNSS 应用研究热点^[1-4]。然而,由于卫星、接收机硬件延迟^[5]及大气(对流层、电离层)时变误差的影响,PPP 收敛速度慢,一旦中断不易恢复,这是实时 PPP 发展亟待解决的问题。可考虑利用已有的区域跟踪站获取大气改正信息,以缩短收敛时间,提高定位精度,达到局域增强效果。对流层延迟中干延迟部分变化稳定,可通过现有模型进行估算^[6],但湿延迟变化非常复杂,很难通过数学模型表达。然而,湿延迟空间相关性较强,可采用一定的数学方法,建立区域天顶对流层湿延迟(ZWD)拟合模型,实时播发给区域内的 PPP 用户,用户利用模型拟合出所在位置的 ZWD。

本文分析了常用的区域对流层延迟拟合模型,提出了一种新的基于多面函数拟合法的对流层拟合模型。实验结果表明,该模型拟合效果较好,将其应用于 PPP 定位解算,能有效提高初始历元的解算精度,收敛后的定位精度与随机游走模型相当。

1 对流层区域拟合模型

1.1 对流层估计方法及常用拟合模型

利用 GNSS 观测值估计天顶对流层延迟的方法有双差法与非差 PPP 法。两种方法获得的 ZWD 精度相当^[6,7]。本文采用非差 PPP 法估计 ZWD,干延迟估算采用 Saastamoinen 模型,投影函数选用 GMF 模型,星历钟差为 IGS 事后精密星历与 30 s 精密钟差。

对流层延迟受测站位置、气象参数及季节性变化等多类因素影响,与测站的位置、高程强相关。在建立区域对流层延迟模型时,应考虑平面位置和高程的影响,同时应顾及在实时 PPP 中的应用性。

常用的区域拟合模型基本可以分为两类:
① 基于流动站与参考站距离的反距离加权内插法。使用该方法时,用户必须实时获取各参考站 ZWD,对于实时 PPP 而言不便实现,不予考虑。
② 直接建立顾及平面与高程影响的数学模型^[8],模型参数可根据区域参考站的坐标、高程及 ZWD,利用最小二乘估计得到。常用的有四参数

曲面模型及仅含高程因子的一次曲线模型等。

1.2 基于多面函数拟合法的 对流层拟合模型

常用的对流层延迟模型在估计其平面上的时变时,仅仅是建立一个简单的多项式模型或甚至不予考虑,这无法很好地反映对流层在平面上的精细变化。多面函数拟合法的 思想为:任何一个圆滑的数学表面总可用一系列有规则的数学表面的总和以任意精度逼近^[9]。设任意一个数学表面上点 (x,y) 处的 $\xi(x,y)$ 可表达成:

$$\xi(x,y)=\sum_{j=1}^u\alpha_jQ(x,y;x'_j,y'_j) \tag{1}$$

式中, $Q(x,y;x'_j,y'_j)$ 为核函数; u 为所取结点的个数; $\alpha_j(j=1,2,\cdots,u)$ 为待估参数。核函数 $Q(x,y;x'_j,y'_j)$ 在理论上可以任意选择,一般采用如下的正双曲面函数:

$$Q(x,y;x'_j,y'_j)=[(x-x'_j)^2+(y-y'_j)^2+\delta^2]^\beta \tag{2}$$

式中, δ^2 为光滑因子,通常 δ 可取一小正数或零; β 取 $1/2,1,-1/2$ 等。本文中选取 $\delta=0,\beta=1/2$ 。在区域对流层拟合中,采用形如式(2)的拟合模型可很好地反映对流层延迟在平面上的相关性,但由于对流层延迟与测站高程强相关,需要对其进行优化,增加与高程相关的拟合参数:

$$f(x,y,h)=\sum_{j=1}^u\alpha_jQ(x,y;x'_j,y'_j)+bh+c \tag{3}$$

1.3 基于区域对流层模型的 PPP 数学模型

传统 PPP 数学模型见式(4),其中,已利用星历、钟差产品消除其影响,双频组合消除电离层延迟影响,并省略了其他可模型化的误差项影响:

$$\begin{aligned} P_c &= \rho(d_x,d_y,d_z)+c\cdot dt_r+mf_{ZWD}\cdot ZWD+\rho_0+\varepsilon(P) \\ \lambda_c\Phi_c &= \rho(d_x,d_y,d_z)+c\cdot dt_r+mf_{ZWD}\cdot ZWD+\lambda_cN_c+\rho_0+\varepsilon(\Phi) \end{aligned} \tag{4}$$

其中, P_c,Φ_c 分别为无电离层组合伪距、相位观测值; $\rho(d_x,d_y,d_z)$ 为方向余弦函数; c 为光速; dt_r 为接收机钟差; mf_{ZWD} 为湿延迟投影函数; ZWD 为天顶湿延迟; ρ_0 为 GNSS 卫星到接收机的几何距离; λ_c 为无电离层组合波长; N_c 为模糊度; $\varepsilon(P),\varepsilon(\Phi)$ 为观测噪声。该模型下的待估参数为测站位置、ZWD 参数和接收机钟差。

采用区域对流层拟合模型后,无需估计 ZWD 参数,上述模型可简化为:

$$\begin{aligned} P_c &= \rho(d_x,d_y,d_z)+c\cdot dt_r+\rho_1+\varepsilon(P) \\ \lambda_c\Phi_c &= \rho(d_x,d_y,d_z)+c\cdot dt_r+\lambda_cN_c+\rho_1+\varepsilon(\Phi) \end{aligned} \tag{5}$$

其中, $\rho_1=\rho_0-mf_{ZWD}\cdot ZWD;ZWD=f(x,y,h);f(x,y,h)$ 为区域对流层拟合模型。

2 不同对流层区域拟合模型效果分析

选取华东某省 2010-10-01~10 共 71 个 CORS 站(见图 1)观测数据进行分析,数据采样间隔为 15 s。从图 2 可以看出,除 TWXY 站外,测站高程分布较均匀。

选择均匀分布的 35 个基准站作为参考站,其他 36 个站作为流动站。分别利用四参数曲面模型、一次曲线模型和多面函数模型对参考站的 ZWD 进行最小二乘拟合,求得拟合系数;基于拟合系数及流动站的位置、高程,得到流动站拟合的 ZWD;将其与真实值(非差估计得到)进行比较分析,拟合残差见图 3。选取的基准站及流动站如图 1 所示,图中三角形表示参考站,圆点表示流动站,方形为多面函数的结点测站,共 10 个(结点测站从 35 个参考站中选取)。

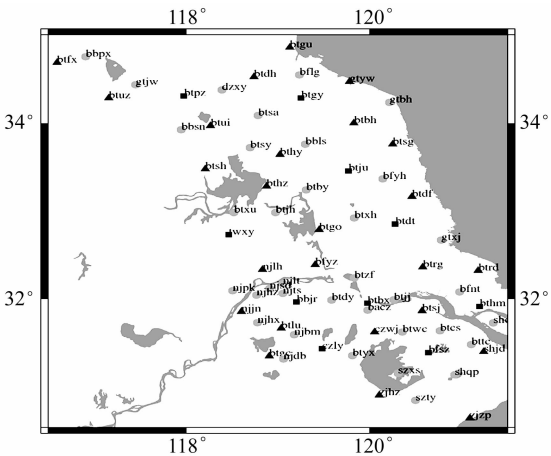


图 1 基准站及流动站分布

Fig. 1 Distributions of Base Stations and Rover Stations

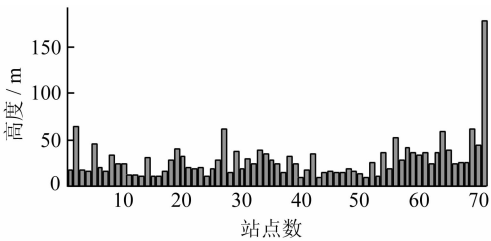


图 2 测站高程分布

Fig. 2 Station Elevation

一次曲线模型仅考虑了高程上的差异,效果较差,残差最大达到 ± 80 mm。四参数曲面模型

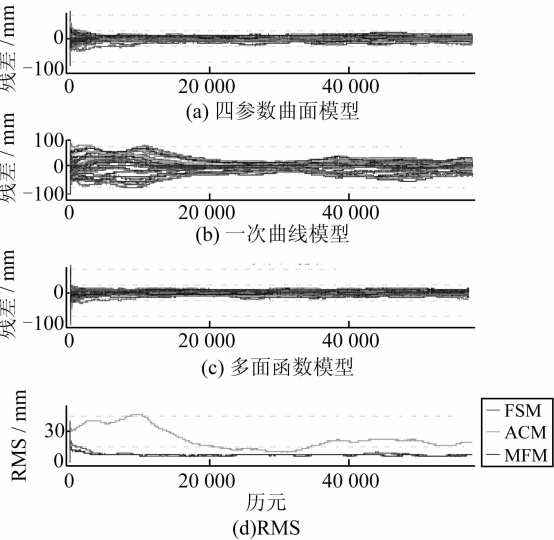


图 3 对流层拟合残差及 RMS
Fig. 3 Fitting Residual and RMS

同时考虑了高程和平面差异及平面坐标的不同梯度的影响,拟合结果较一次曲线模型有显著改善,残差值一般不超过 ± 20 mm。整体而言,多面函数模型与四参数曲面模型的精度相当,RMS 约为 ± 6 mm。在初始阶段,多面函数模型的 RMS 值远小于四参数曲面模型,历元间稳定性更强,无明显起伏。由此可见,多面函数模型更好地描述了对流层在平面上的变化,拟合效果在 3 种方法中最佳。

3 不同对流层处理策略 PPP 定位结果

分别采用模型拟合及随机游走估计处理对流层进行动态 PPP 解算,分析不同策略对 PPP 定位精度及收敛速度的影响。数据解算采用笔者自编的 Passion 软件,卫星轨道和卫星钟差产品为 IGS 事后产品,仅采用多面函数模型进行对流层拟合。在第 282 日,BTBY 测站的对流层拟合残差较大,约为 13 mm,BACZ 测站的残差较小,约

为 4 mm,较有代表性,因此,选取当日 BTBY、BACZ 站的观测数据进行不同对流层处理策略的动态 PPP 解算。

图 4(a)、4(b)为随机游走估计的定位结果,图 4(c)、4(d)为采用模型拟合的定位结果。为更好地显示对收敛的影响,仅截取前 600 个历元(即前 150 min)的数据。从图中可以看出,采用模型拟合的方法能够在第一个历元就提供较为准确的 ZWD,使观测方程减少了一个未知数,增强了方程的强度,显著提高了初始历元高程方向的解算精度,使初始定位精度从 m 级提高到亚 m 级。表 1 的结果显示,在全部时段的结果中,由模型拟合方法得到的 RMS 统计结果明显优于随机游走估计方法。在 PPP 完全收敛后,两种方法所得到的 BACZ 站 3 个方向上的精度相当,而 BTBY 站在平面方向精度相当,在高程方向上模型拟合法的精度相对稍差,两方法的差异约为 6 mm。这主要是因为 BACZ 站的多面函数拟合残差较小,而 BTBY 的拟合残差相对较大。同时,可认为 PPP 定位中对流层消除不完善主要影响垂向定位精度,而对平面定位结果影响甚微。然而 ZWD 一般在 2 dm 以内,对测距所造成的影响也是 dm 级,它不是影响 PPP 收敛至 cm 级的主要原因。采用模型拟合的方法并不能显著减少 PPP 收敛至 cm 级的时间,提高 PPP 的收敛速度需寻求其他方法。

表 1 不同对流层处理策略下 RMS 统计/m
Tab. 1 RMS of PPP Results/m

测站	ZWD	时段	N	E	U
BTBY	模型	全部	0.032 5	0.038 1	0.076 4
	拟合	收敛	0.023 0	0.030 2	0.053 0
	随机	全部	0.032 7	0.040 5	0.083 2
	游走	收敛	0.022 5	0.030 6	0.047 2
BACZ	模型	全部	0.030 2	0.063 6	0.077 4
	拟合	收敛	0.019 5	0.026 4	0.035 7
	随机	全部	0.023 8	0.051 9	0.097 6
	游走	收敛	0.018 8	0.026 4	0.035 2

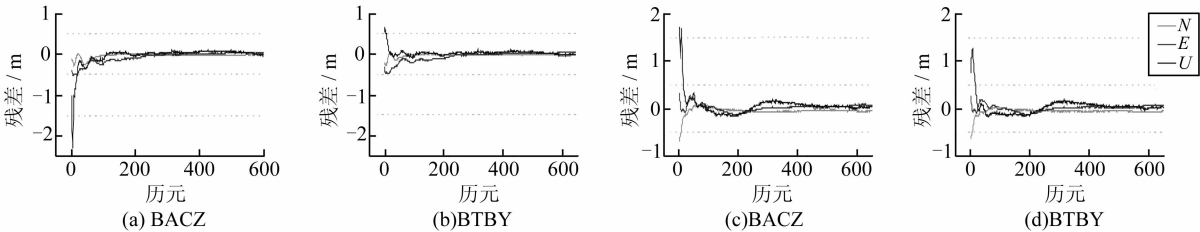


图 4 不同对流层处理策略的 PPP 处理结果
Fig. 4 PPP Processing Results of Different Troposphere Treatments

由此可见,采用本文所提出的多面函数模型拟合对流层湿延迟进行 PPP 定位的方法,能够减

少未知参数个数,增强方法强度及稳定性,提高初始历元的解算精度,收敛后定位结果与随机游走

方法的精度相当。

4 结 语

本文所提出的多面函数对流层拟合模型能够更好地描述区域对流层的平面变化,利用模型拟合对流层可以有效提高初始历元定位结果,但对于 PPP 完全收敛效果有限。对流层湿延迟模型的建立与当地的地形气候相关性较强,因此,探索具有更高精度的适合多个区域的对流层拟合模型及进一步提高 PPP 收敛至 cm 级速度将是下一步的工作重点。

参 考 文 献

[1] 施闯,楼益栋,宋伟伟,等. 广域实时精密定位原型系统及初步结果[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009,34(11): 1 271-1 274

[2] 张小红,李星星,郭斐,等. 基于服务系统的实时精密单点定位技术及应用研究[J]. 地球物理学报, 2010(6): 1 308-1 314

[3] Dow J, Neilan R E, Rizos C. The International GNSS Service in a Changing Landcape of Global Na-

vigation Satellite Navigation Satellite System[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(3/4):191-198

[4] 宋伟伟. 导航卫星实时精密钟差确定及实时精密单点定位理论方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2011

[5] Ge M, Gendt G, Rothacher M, et al. Resolution of GPS Carrier-Phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations[J]. Journal of Geodesy, 2008, 82(7): 389-399

[6] 张双成. 地基 GPS 遥感水汽空间分布技术及其应用的研究[D]. 武汉:武汉大学,2009

[7] 张瑞,宋伟伟,朱爽. 地基 GPS 遥感天顶水汽含量方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2010,35(6):691-693

[8] 熊用良,黄丁发,丁晓利,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

[9] 刘经南,施闯,姚宜斌,等. 多面函数拟合法及其在建立中国地壳平面运动速度场模型中的应用研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2001,26(12): 500-503

第一作者简介:姚宜斌,教授,博士,博士生导师,主要从事测量数据处理理论与方法研究。
E-mail:ybyao@sgg.whu.edu.cn

A New Regional Troposphere Fitting Model and Its Application to PPP

YAO Yibin¹ ZHANG Rui¹ YI Wenting² SONG Weiwei²

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University,129 Luoyu Road, Wuhan 430079,China)

(2 Research Center of GNSS, Wuhan University,129 Luoyu Road, Wuhan 430079,China)

Abstract: Based on the analysis of common regional troposphere surface models such as four-parameter surface model and a curve model, we propose a new kind of regional troposphere delay model based on multi-faceted functions. We use our zero-difference troposphere estimate software to process the CORS data of one province to analyze results of various types of model. The experimental results show that multi-faceted function model fitting residual RMS of the troposphere is about ± 6 mm, and the convergence in the initial stage is much smaller than four-parameter surface model, greater stability between the epoch, there is no significant ups and downs, to better describe the regional troposphere. At the same time, we use different troposphere solutions to get PPP results, the two ways are random walk and model fitting. The experimental results indicate that model fit method can reduce the number of unknown parameters, and enhance strength and stability, which will improve the accuracy of the initial epochs. The accuracies of positioning after the convergence are with considerable accuracy. This new method can help to get dm-level PPP results quickly, but it doesn't have obvious effect for improving the speed of convergence to cm-level.

Key words: troposphere; fitting model; PPP; multi-faceted function