引文格式：郝伟涛. 湿延迟先验约束的 GNSS PPP 方法研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(10):78-83. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.10.017

湿延迟先验约束的GNSS PPP方法研究

郝伟涛[1,2,3]

（1. 河南省地质局矿产资源勘查中心，河南 郑州 450006；2. 河南省天空地遥感智能监测工程技术研究中心，河南 郑州 450006；
3. 河南省自然资源科技创新中心（天空地遥感智能监测研究），河南 郑州 450006）

摘　要：为了提高全球导航卫星系统（GNSS）精密单点定位（PPP）的性能，基于GNSS数据、探空数据和欧洲中尺度天气预报中心第五代再分析数据（ERA5）精确计算了研究区域内的湿延迟，并提出分别基于探空站计算的湿延迟（ZWD）和欧洲中期天气预报中心第五代再分析数据计算的湿延迟（ERA5　ZWD）约束下的PPP方法。研究对比了标准静态/动态PPP、标准静态/动态PPP（估计梯度）、基于ERA5 ZWD约束和基于探空站ZWD约束静态/动态PPP的定位性能，并探讨测站高度和纬度对ZWD估计精度及静态PPP性能的影响。结果表明，GNSS估计的ZWD与探空数据计算的ZWD具有较高一致性，说明探空数据计算的ZWD具有更高可靠性。在PPP收敛时间方面，基于探空数据和ERA5 ZWD约束的静态PPP相比于标准静态PPP方法，收敛速度分别提高55%和50%以上，基于ERA5 ZWD约束和探空站ZWD约束的动态PPP收敛速度较2种标准PPP改善也超过了50%。相较于标准PPP，ZWD先验约束在1~8 h观测数据下显著提升了静态PPP的定位精度，基于ERA5 ZWD约束和探空站ZWD约束的静态PPP方法相较于标准PPP方法的定位精度在3个方向（E、N和U）分别提高2.80%、4.05%、11.40%和3.74%、4.05%、14.04%，但在长期观测下（16 h和24 h）改善有限。这表明先验ZWD约束对短期观测数据定位精度的提升效果更明显。测站高程变化对收敛速度和定位精度均有较大影响，而纬度变化对收敛速度有一定影响，但对定位精度的影响不具统一趋势。

关键词：精密单点定位；湿延迟；全球导航卫星系统；欧洲中期天气预报中心第五代再分析数据；探空站；高程；纬度

中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）10-0078-06

Research on GNSS Precise Point Positioning Based on Zenith Wet Delay Prior Constraints

HAO Weitao[1,2,3]

(1. Mineral Resources Exploration Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450006, China;
2. Henan Remote Sensing Intelligent Monitoring Engineering Technology Research Center for Satellite, Aircraft and Land Survey, Zhengzhou 450006, China;
3. Henan Natural Resources Science and Technology Innovation Center (Research on Remote Sensing Intelligent Monitoring for Satellite, Aircraft and Land Survey), Zhengzhou 450006, China)

Abstract: To enhance the performance of precise point positioning (PPP) in the global navigation satellite system (GNSS), we used GNSS data, radiosonde data and the fifth generation of reanalysis data from the European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ERA5) to accurately calculated zenith wet delays (ZWD) in the study area, and proposed PPP methods constrained by ZWD calculated from radiosonde stations and from ERA5 data (ERA5 ZWD). Then, we compared the positioning performance of standard static/kinematic PPP, standard static/kinematic PPP with gradient estimation, PPP constrained by ERA5 ZWD, and PPP constrained by radiosonde ZWD, and examined the impact of station height and latitude on ZWD estimation accuracy and static PPP performance. The results indicate that there is a high consistency between ZWD estimated by GNSS and that calculated from radiosonde data, suggesting the higher reliability of radiosonde-derived ZWD. In terms of PPP convergence time, the PPP constrained by radiosonde data and ERA5 ZWD improved convergence speed by more than 55% and 50%, respectively, compared to the standard static PPP method. Kinematic PPP constrained by ERA5 ZWD and radiosonde ZWD also showed improvements in convergence speed of over 50% compared to both standard PPP methods. Compared to standard static PPP, priori ZWD constraints significantly enhanced positioning accuracy with 1 to 8 hours of observational data. The positioning accuracy of PPP constrained by ERA5 ZWD and radiosonde ZWD improved by 2.80%, 4.05%, 11.40%, and 3.74%, 4.05%, 14.04% in the E, N, and U directions, respectively, compared to standard static PPP. However, the improvements were limited for long-term observations (16 and 24 hours), which indicated that priori ZWD constraints had a more pronounced effect on the positioning accuracy for short-term observational data. Changes in station elevation significantly affected both convergence

项目来源：国家自然科学基金资助项目（41704019）。

作者简介：郝伟涛（1986—），硕士，高级工程师，主要从事大地测量、无人机测绘、工程测量等工作，E-mail：houtao888666@163.com。

speed and positioning accuracy, while latitude changes had some impact on convergence speed but showed no consistent trend regarding positioning accuracy.

Key words: PPP, ZWD, GNSS, ERA5, radiosonde station, elevation, latitude

全球导航卫星系统（global navigation satellite system, GNSS）精密单点定位（precise point positioning, PPP）技术，通过综合利用伪距和载波相位观测值及高精度卫星轨道和钟差产品，能在单一GNSS接收机基础上实现毫米至分米级的定位精度，已广泛应用于地球科学和工程领域[1-3]。然而，GNSS PPP技术的性能受多种误差源影响，其中对流层延迟效应是主要的限制因素之一[4-5]，特别是在垂直方向上，对流层延迟的不确定性直接影响到PPP解算的精度和收敛时间[6-7]。传统方法通过采用经验对流层模型对延迟进行预测和修正，然而这种方法在精度和适用性上存在限制，特别是在极端气候条件下或高精度应用场景中[8-9]。

鉴于现状的不足，本文基于中国中西部地区陆态网GNSS数据、探空站数据和ERA5数据，计算GNSS测站处的天顶湿延迟（zenith wet delay, ZWD）并评定其精度，采用ZWD先验约束的PPP方法对数据进行解算，深入分析其对多系统GNSS静态PPP定位性能的影响，同时分析了测站高程及纬度对PPP性能的影响。

1　研究方法

1.1　GNSS估计可降水汽含量方法

利用GNSS载波相位观测方程将天顶对流层湿延迟作为未知参数求解：

$$L_{i,f}^{j}=\rho_i^j+c\left(dt_i-dt^j\right)+M\times(D_{\mathrm{ZHD}}+D_{\mathrm{ZWD}})-I_{i,f}^{j}+\lambda_f N_{i,f}^{j}+\varepsilon_{i,f}^{j} \tag{1}$$

式中，i和j分别为接收机和卫星；ρ_i^j接收机到卫星的几何距离；dt_i和dt^j分别为接收器钟差和卫星钟差；M对流层映射函数；c为光速；$I_{i,f}^{j}$为电离层延迟；λ_f为相位观测的波长；$N_{i,f}^{j}$为相位模糊度；D_{ZHD}为天顶对流层干延迟；D_{ZWD}为天顶对流层湿延迟，其中对流层总延迟（zenith total delay，ZTD）等于对流层干延迟和对流层干延迟的和；$\varepsilon_{i,f}^{j}$为其他误差。根据不同的ZWD估计方案，D_{ZWD}参数设置为自由估计、输入先验值等方式。

对流层干延迟（zenith hydrostatic delay，ZHD）可由萨斯塔莫宁（saastamoinen）模型计算：

$$D_{\mathrm{ZHD}}=\frac{0.002\,277\,68\times P}{1-0.002\,66\times\mathrm{COS}(2L)-0.000\,28\times H} \tag{2}$$

式中，P为大气压；L为GNSS站点的纬度；H为GNSS测站高程。

假设PPP定位解算的参数估计的误差方程为：

$$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{B}X-l \tag{3}$$

式中，$\boldsymbol{V}$为观测值残差向量；$\boldsymbol{B}$为系数矩阵；l为误差方程自由项；$\boldsymbol{X}=[dx,dy,dz,\mathrm{cd}\,t_r,D_{\mathrm{ZWD}},N^1,\ldots,N^m]$为状态向量；$dx,dy,dz$为测站三维坐标参数；$\mathrm{cd}\,t_r$和$D_{\mathrm{ZWD}}$分别为接收机钟差参数和对流层天顶湿延迟参数；$N^1,\ldots,N^m$为不同卫星的电离层延迟参数和载波相位的模糊度参数。

通过对误差方程的求解，即可将上述参数解算得到。

1.2　分层大气资料估计可降水汽含量方法

分别利用ERA5模型和探空资料提供的气压、温度、相对湿度等分层气象参数数据计算天顶对流层湿延迟，公式为：

$$D_{\mathrm{ZWD}}=10^{-6}\int_{s1}^{s2}N_W\,\mathrm{d}s \tag{4}$$

式中，N_W为湿直射率，$s1$和$s2$为积分路径的起始点，计算公式为：

$$N_W=\frac{K_2\cdot e}{T+273.15}+\frac{\mathrm{K}_3\cdot e}{(T+273.15)^2} \tag{5}$$

$$e=\frac{R_h\cdot P}{0.622} \tag{6}$$

式中，P为大气压（单位为hPa）；R_h为比湿，e为水汽压（单位为hPa）；T为温度（单位为K）；$K_2=22.97$ K/hPa，$\mathrm{K}_3=375\,463$ K^2/hPa为常数。

1.3　精度评定

本文计算了平均绝对误差（mean absolute error, MAE）、均方根误差（root-mean-square error, RMSE），并分析了MEA和RMSE与纬度和高程的关系。

MAE反映了测量值与参考值差异的平均程度，是评价误差范围的指标。RMSE对异常值更为敏感，它衡量了数据的可靠性和稳定性。较低的MAE和RMSE指示更高的精确度，其计算公式为：

$$\mathrm{MAE}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\mathrm{PWV}_i-\mathrm{PWV}_i^G\right| \tag{7}$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\mathrm{PWV}_i-\mathrm{PWV}_i^G)^2} \tag{8}$$

式中，PWV_i为ERA5或探空站第i个历元的ZWD值；PWV_i^G为GNSS测站反演的第i个历元的ZWD值；N为观测样本数。

2 结果与分析

2.1 数据介绍和数据解算策略

本文的研究区域为中国中西部地区，经纬度范围为31~44°N，93~107°E，海拔从1 100 ~3 700 m不等，研究区域主要有高原高山气候和温带大陆性气候两种气候类型，研究区域内的GNSS站和探空站分布如图1所示。

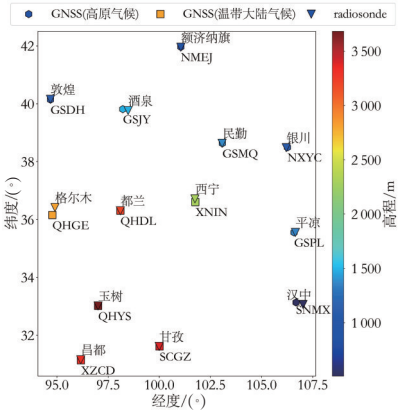


图1 GNSS测站及探空站分布图

GNSS数据由中国陆态网提供(ftp://ftp.cgps.ac.cn)，时间为2018年和2019年。数据使用Bernese 5.4进行解算，数据解算过程中进行了固体潮、海潮和极潮的改正[10]。为了与探空站数据进行时间匹配，取每天协调世界时（coordinated universal time, UTC）0时和UTC 12时的ZWD数据。

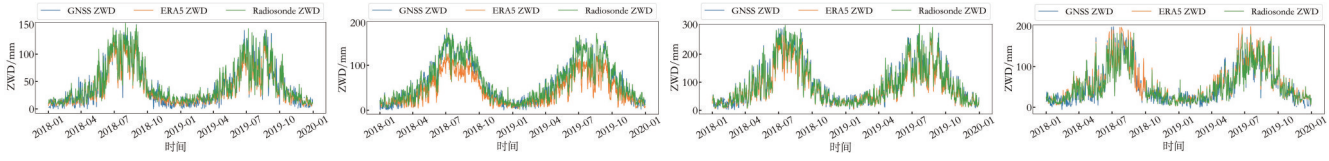
探空站数据由美国怀俄明大学气象数据网站（http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html）提供[11]，于每天的UTC 0时和UTC 12时进行观测。利用探空资料提供的分层气象参数数据计算ZWD。

ERA5数据（https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5）由欧洲中尺度天气预报中心提供，是最新一代大气再分析资料。其水平分辨率为0.25° × 0.25°，时间分辨为1 h，垂直分辨率为37层[12]。利用ERA5模型提供的分层气象参数数据计算ZWD。实验过程中，对ERA5数据进行了克里金插值，以适应不同测站的实际位置和海拔情况。

本研究在数据解算中使用的是双频无电离层组合消除一阶项，采用联合无几何组合和MW组合的周跳探测方式；采用白噪声模型估计接收机钟差；对流层干延迟基于saastamoinen模型计算，映射函数为GMF模型，对流层参数估计频率为每小时一次，此参数可在程序中设置。采用的卫星系统为全球定位系统、北斗、格洛纳斯和伽利略。

2.2 不同方法计算ZWD精度及影响因素分析

为了验证GNSS反演ZWD的精度，本文将GNSS ZWD与就近的探空站ZWD数据及ERA5 ZWD数据进行对比，由于篇幅限制，仅展示部分测站的结果，如图2所示。



a QHGE测站处ZWD　b SCGZ测站处ZWD　c GSPL测站处ZWD　d NMEJ测站处ZWD

图2 部分测站GNSS ZWD、ERA5 ZWD和探空站ZWD对比

由图2可见，展示的4个测站处的ZWD变化趋势非常一致，均表现出明显的周期特性，夏季ZWD较大，而冬季较小；展示的4个测站中SCGZ测站的海拔最高，此测站处ERA5 ZWD与GNSS ZWD出现明显的系统偏差；其他3个测站处3种方法得到的ZWD系统偏差不明显。

为了更清晰的分析不同方法估计ZWD的差异，本文对ERA5 ZWD、探空站ZWD与GNSS ZWD差值的最大值(maximum，max)、最小值(minimum，min)、平均值（mean）和标准差（standard deviation，std）进行统计，结果如表1所示。

由表1可知，所有测站处ERA5 ZWD与GNSS ZWD差值均值的平均值为0.72 mm，不同测站处差值均值波动较大，通过查阅图1中的信息，大部分ZWD差值均值较大的测站处于高山高原气候区，海拔较高。而探空站ZWD与GNSS ZWD差值的均值波动较小，所有测站处ZWD差值均值的平均值为0.65 mm。所有测站处ERA5 ZWD、探空站ZWD与GNSS ZWD差值标准差的均值分别为14.5 mm和12.5 mm，由此可见，气候类型对ZWD的精度有一定影响，研究区域GNSS ZWD与探空站ZWD一致性更高，这也说明了GNSS反演的ZWD精度较高。

为了进一步分析不同方法得到的ZWD的精度，探讨影响ZWD精度的因素，结果如图3所示。

由图3a和3c可知，当纬度高于33°时，ERA5 ZWD的MAE/RMSE出现明显的减小，随着纬度的增加，探空站ZWD的MAE/RMSE出现了缓慢上升的趋势。由图3b和3d可得，当海拔低于3 300 m时，随着

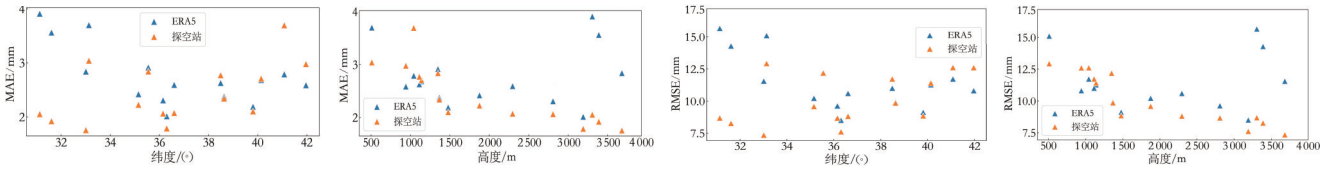
表1　ERA5 ZWD、探空站ZWD与GNSS ZWD差值统计

测站	ERA5和GNSS/mm				探空站和GNSS/mm			
	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差
SNMX	35.52	−84.67	4.27	19.03	62.12	−52.04	3.82	16.30
NMEJ	48.63	−44.27	2.83	13.63	47.88	−58.15	−1.91	12.89
NXYC	47.46	−43.95	1.41	13.87	52.42	−47.75	−1.04	12.77
GSDH	51.28	−43.15	3.49	14.20	51.28	−43.85	2.09	13.38
GSPL	38.97	−61.97	−1.57	15.37	51.22	−54.81	−1.06	15.36
GSMQ	45.15	−39.14	3.82	12.53	42.59	−43.28	−0.75	12.11
GSJY	46.20	−31.71	2.77	11.50	48.26	−29.23	1.37	10.15
XNIN	29.64	−54.11	−1.21	13.36	37.23	−44.54	−1.02	11.10
QHGE	33.89	−41.92	−2.16	12.13	37.36	−34.52	1.71	10.93
QHDL	38.24	−34.60	2.84	10.72	38.62	−31.75	1.17	9.59
XZCD	48.46	−71.39	−2.48	19.74	53.80	−34.15	2.33	13.94
SCGZ	38.90	−71.32	−1.35	18.00	61.74	−55.25	−1.29	14.41
QHYS	36.14	−54.30	−3.27	14.56	35.09	−27.47	3.06	9.26

高程的增加，ERA5 ZWD的MAE/RMSE出现明显的下降，海拔超过3 300 m时，ERA5 ZWD的MAE/RMSE出现明显的增大。而探空站ZWD的MAE/RMSE随着高程的增加明显的下降。由此可见，ZWD的反演精度与测站的纬度和高程有着密切的联系。

2.3　基于ERA5/探空湿延迟先验约束的PPP性能分析

本节从PPP收敛速度和PPP坐标解算精度（RMSE）2个角度评价不同方法PPP的性能，并分析测站纬度和高程对收敛速度和坐标解算精度的影响。首先利用标准PPP方法对GNSS数据进行解算，并统计收敛速度及坐标解算精度；然后分别将PPP模型中的ZWD参数给定一个先验值进行约束，此先验值来自ERA5模型和探空站数据计算的ZWD。



a ERA5 ZWD的MAE与纬度的关系　b ERA5 ZWD的MAE与高程的关系　c 探空站ZWD的RMSE与纬度的关系　d 探空站ZWD的RMSE与高程的关系

图3　ZWD的MAE/RMSE与纬度和高程的关系

2.3.1　PPP收敛速度分析

首先采用不同的ZWD估算方法，对实验区域2018年和2019年的数据进行静态PPP和动态PPP解算，并统计各个测站所有时间内的平均收敛速度，基于不同ZWD估算方法的PPP平均收敛速度如表2所示。

表2　不同静态PPP方法的平均收敛时间

方法	时间/min		
	N	E	U
标准静态PPP	10.2	19.8	26.1
标准静态PPP(梯度)	10.3	19.7	26.0
ERA5 ZWD约束（静态）	9.9	19.2	12.6
探空站ZWD约束（静态）	9.8	19.0	11.5
标准动态PPP	13.5	24.2	30.2
标准动态PPP(梯度)	13.3	23.8	29.9
ERA5 ZWD约束（动态）	12.2	22.5	14.8
探空站ZWD约束（动态）	11.9	22.1	13.1

由表2可得，N方向的收敛速度最快，U方向的收敛速度最慢，N和E方向，ERA5 ZWD约束和探空站ZWD约束的静态/动态PPP收敛速度分别较2种标准静态/动态PPP的略快，但差别不大，标准静态/动态PPP和估计梯度的标准静态/动态PPP的收敛速度几乎相同。U方向基于ERA5 ZWD约束和探空站ZWD约束的静态/动态PPP收敛速度较2种标准PPP改善非常明显，其中基于ERA5 ZWD约束的静态PPP收敛速度较标准静态PPP和标准静态PPP（梯度）分别提高了51.72%、51.54%，而基于探空站ZWD约束的PPP收敛速度较标准静态PPP和标准静态PPP（梯度）分别提高了55.94%、55.77%；基于ERA5 ZWD约束和探空站ZWD约束的动态PPP收敛速度较2种标准PPP改善也超过了50%。由此可见，实验区域基于ZWD约束的可以更好地加速PPP的收敛，其中基于探空站ZWD约束的PPP方法效果更为明显。

由2.1节可知，不同方法计算的ZWD受测站高程和纬度的影响较大，因此，本文将探讨以上2种因素与U方向静态PPP收敛速度的关系，结果如表3和表4所示。

表3　不同静态PPP方法收敛速度与高程的关系

高程/m	标准PPP/min	标准PPP（梯度）/min	ERA5 ZWD约束/min	探空站ZWD约束/min
500~1 200	29.2	28.7	13.3	13.3
1 300~2 300	25.5	25.5	11.5	10.8
2 800~3 700	23.5	23.8	13.2	10.4

由表3可知，随着测站高程的增加，2种标准静态PPP的收敛速度均呈现出加速的趋势，这可能与气候有一定关系。随着高度的增加，气候由温带大陆性气候变为高山高原气候，水汽随之减少，导致ZWD也明显减小，从而加速了收敛过程。随着测站高程的增加，ERA5 ZWD约束的静态PPP呈现出先加速后减

速的特点，探空站ZWD约束的静态PPP呈现出加速收敛的特点，这与ERA5/探空站ZWD的精度分布特点的一致的。

表4 不同静态PPP方法收敛速度与纬度的关系

纬度/（°）	标准PPP/min	标准PPP（梯度）/min	ERA5 ZWD约束/min	探空站ZWD约束/min
31~34	28.2	28.5	14.8	11.4
35~38	26.5	26.3	11.5	11.5
38~42	23.6	23.2	11.4	11.7

由表4可知，随着纬度的增加，2种标准静态PPP的收敛速度均呈现出加速的趋势。较低纬度区域（31~34°）向中纬度（35~38°）过渡的过程中，ERA5 ZWD约束的PPP收敛速度有明显的加速，而从中纬度向高纬度过渡的过程中，静态PPP收敛速度变化不明显，探空站ZWD约束的静态PPP收敛速度随纬度变化也不明显。

2.3.2 PPP定位精度分析

为了分析不同ZWD估算方法对静态/动态GNSS PPP定位性能的影响，对实验区域测站每天不同时段的数据进行静态和动态解算，并统计3个方向定位偏差的RMSE以及动态结果收敛后3个方向定位偏差的RMSE，结果如表5所示。

表5 不同时段静态/动态PPP的平均RMSE/cm

时段/h	方向	PPP	PPP（梯度估计）	ERA5 ZWD约束	探空站ZWD约束
1	E	5.52	5.44	5.31	5.32
	N	3.63	3.53	3.52	3.51
	U	5.55	5.78	5.04	4.92
4	E	3.03	3.22	2.94	2.89
	N	2.34	2.31	2.22	2.23
	U	3.37	3.28	3.04	2.89
8	E	2.21	2.21	2.18	2.10
	N	1.52	1.43	1.40	1.41
	U	2.37	2.41	2.09	2.02
16	E	1.70	1.79	1.70	1.71
	N	1.27	1.28	1.19	1.17
	U	1.68	1.71	1.62	1.50
24	E	1.71	1.62	1.51	1.51
	N	1.22	1.20	1.13	1.02
	U	1.69	1.79	1.61	1.53
动态	E	2.22	2.20	1.89	1.90
	N	2.11	2.21	1.89	1.88
	U	2.80	2.70	2.31	2.30

由表5所示，2种标准静态PPP在不同时段的定位精度分别优于6 、3.5 、2.5 、2 cm和2 cm，其中16 h和24 h观测数据的静态PPP结果差异不大。ERA5 ZWD约束的静态PPP在不同时段的定位精度分别优于5.5 、3 、2.5、2 cm和2 cm，在1 h和4 h观测数据的情况下数据解算精度有明显提高，其中U方向精度提升明显。探空站ZWD约束的静态PPP在不同时段的定位精度分别优于5.5 、3 、2.5 、2 cm和2 cm，相对于ERA5 ZWD约束的静态PPP方法的解算精度略有提升。动态PPP定位精度均优于3 cm，基于ERA5 ZWD约束和探空站ZWD约束的动态PPP的水平定位精度较2种标准PPP提高3~4 mm，垂直方向可提高4~5 mm。由此可见，2种ZWD先验约束的静态PPP方法对于短时间的观测数据的解算精度有明显提升，对U方向的定位精度提升较大。

同时，本文对2018年和2019年所有的测站24 h解算结果进行分析，探讨了高程和纬度2个因素对不同PPP方法垂直方向定位精度的影响，结果如表6和表7所示。

表6 平均RMSE与纬度的关系/cm

纬度/（°）	PPP	PPP（梯度估计）	ERA5约束	探空站约束
31~34	1.49	1.48	1.47	1.44
35~38	1.51	1.51	1.43	1.44
38~42	1.49	1.51	1.44	1.45

表7 平均RMSE与高程的关系/cm

高程/m	PPP	PPP（梯度估计）	ERA5约束	探空站约束
500~1 200	1.47	1.47	1.46	1.46
1 300~2 300	1.52	1.53	1.36	1.35
2 800~3 700	1.50	1.49	1.49	1.34

由表6可知，随着纬度的升高，4种方法静态PPP的垂直方向的定位精度无明显规律变化。由表7所示，2种标准静态PPP方法的定位精度受测站高程的影响不大。ERA5 ZWD约束的静态PPP垂直方向的定位精度随着测站高程的升高先提高后降低，通过观察图3 b和3d，ERA5 ZWD的精度呈现出相同的特点，这可能是导致ERA5 ZWD约束的静态PPP的定位精度变化的原因。在海拔超过1 200 m时，探空站ZWD约束的静态PPP定位精度明显提高，这与探空站估算ZWD的精度密切相关。在本文的PPP解算过程中，仅分析了不同地理要素的影响，没有将地理因素作为显式的校正因素纳入PPP模型中。后续的研究中，我们计划进一步探讨如何在PPP解算过程中更好地顾及高程等地形因素对对流层误差的影响，以提升定位精度和收敛速度。

3 结 语

在本研究中，我们基于2018年和2019年的GNSS数据、探空站数据及ERA5再分析数据，在PPP中引入先验ZWD约束，显著提升了PPP的收敛速度和定位精度。结果表明，ZWD的反演精度随纬度增加而降低，随高程增加而提高；与标准PPP相比，引入ZWD约束后的PPP在短时间观测下定位精度显著提高，尤其是探空站数据约束下的PPP表现最佳。此外，高程超过1 200 m的测站在定位精度上显示显著增加。以

上发现强调了地理位置对PPP性能的影响，并展示了先验ZWD约束在提高地理测量精度方面的潜在优势。但是探空数据和ERA5计算的对流层延迟，是事后改正，并不具备实时性。另外，在更大范围或探空站覆盖不足的情况下，建议结合其他高时空分辨率的大气再分析资料（如ERA5）来补充湿延迟先验约束，以弥补探空站空间分布的不足。ERA5等数据尽管精度相对探空站略低，但其全球覆盖的优势使其可以在无探空数据的区域继续实现对湿延迟的有效估算。

参考文献

[1] 肖鹏,孙付平,张伦东,等. 北斗三号PPP-B2b服务实时动态定位性能分析[J]. 导航定位学报,2023,11(5):21-28

[2] 袁兴明. GPS/BDS-3/Galileo精密单点定位模糊度固定[J]. 导航定位学报,2023,11(5):84-91

[3] Geng J, Wen Q, Zhang Q, et al. GNSS Observable-specific Phase Biases for All-frequency PPP Ambiguity Resolution[J]. Journal of Geodesy, 2022, 96(2):11

[4] 张士柱,李莎莎,肖伟,等. 利用Multi-GNSS估计天顶对流层延迟[J]. 地理空间信息,2019,17(5):68-72

[5] Gao R, Liu Z, Odolinski R, et al. Improving GNSS PPP-RTK Through Global Forecast System Zenith Wet Delay Augmentation[J]. GPS Solutions,2024,28(2):1-14

[6] Cui B, Wang J, Li P, et al. Modeling Wide-area Tropospheric Delay Corrections for Fast PPP Ambiguity Resolution[J]. GPS Solutions,2022,26(2):56

[7] 杨世超. BDS-3三频PPP收敛速度与定位精度分析[J]. 地理空间信息,2023,21(6):79-81

[8] Zhang H, Yuan Y, Li W. An Analysis of Multisource Tropospheric Hydrostatic Delays and Their Implications for GPS/GLONASS PPP-based Zenith Tropospheric Delay and Height Estimations[J]. Journal of Geodesy, 2021, 95(7):83

[9] Gong Y, Liu Z, Chan P W, et al. Augmenting GNSS PPP Accuracy in South China Using Water Vapor Correction Data from WRF Assimilation Results[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC 2021) Proceedings:Volume I. Springer Singapore,2021:653-670

[10] 孟子恒,高猛,谭春波,等. 潮汐对BDS精密单点定位的影响[J]. 导航定位学报,2024,11(3):1-11

[11] 郭敏,张捍卫,李鹏杰. 大气加权平均温度对GNSS PWV精度的影响分析[J]. 地球物理学进展,2023,38(4):1 455-1 465

[12] 郭秋英,黄守凯,李德伟,等. 哨兵1号的对流层湿延迟变化提取与分析[J]. 导航定位学报,2023,11(2):203-210

（上接第72页）

Clouds Processing Using Nonlocal Neural Networks with Adaptive Sampling[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,2020: 5 589-5 598

[9] Fareed N, Flores J P, Das A K. Analysis of UAS-LiDAR Ground Points Classification in Agricultural Fields Using Traditional Algorithms and PointCNN [J]. Remote Sensing,2023,15(2):483

[10] Xu Q, Zhou Y, Wang W, et al. SPG: Unsupervised Domain Adaptation for 3D Object Detection Via Semantic Point Generation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision,2021:15 446-15 456

[11] Dosovitskiy A, Beyer L, Kolesnikov A, et al. An Image is Worth 16x16 Words:Transformers for Image Recognition at Scale[J]. ArXiv Preprint ArXiv,2010.11 929,2020

[12] Zhao H,Jiang L,Jia J,et al. Point Transformer[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision,2021:16 259-16 268

[13] Mao J,Xue Y,Niu M,et al. Voxel Transformer for 3D Object Detection[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision,2021:3 164-3 173

[14] Park C,Jeong Y,Cho M,et al. Fast Point Transformer[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2022:16 949-16 958

[15] Lai X, Liu J, Jiang L, et al. Stratified Transformer for 3D Point Cloud Segmentation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,2022:800-809

[16] Jang E,Gu S,Poole B. Categorical Reparameterization with Gumbel-softmax[J]. Arxiv Preprint ArXiv:1611.01144, 2016

[17] Xiao Y, Rosdahl J. Throughput and Delay Limits of IEEE 802.11[J]. IEEE Communications Letters,2002,6(8):355-357

[18] Qin N, Tan W, Ma L, et al. Open GF:An Ultra-large-scale Ground Filtering Dataset Built upon Open ALS Point Clouds Around the World[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,2021:182-191

[19] Hu Q, Yang B, Xie L, et al. RandLA-net:Efficient Semantic Segmentation of Large-scale Point Clouds[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,2020:1 108-1 117

[20] 郝娇娇. 基于Transformer和无向图的弱监督点云场景分割[D]. 南京:南京信息工程大学,2023