

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.06.011

# 基于多模 PPP-AR 技术的大气水汽探测性能分析

郭秋英<sup>1</sup>, 薛学龙<sup>1</sup>, 余 森<sup>1</sup>, 张海平<sup>2</sup>, 李国伟<sup>2</sup>, 毕京学<sup>1</sup>

(1. 山东建筑大学测绘地理信息学院, 济南 250101;

2. 山东省国土测绘院, 济南 250102)

**摘要:**精密单点定位(precise point positioning, PPP)反演大气可降水量(precipitable water vapor, PWV)具有精度高、实时性强等优点,能够在灾害监测、降雨预报及探测降水信息等方面发挥重要作用。为评估整周模糊度固定模式下 PPP-AR(PPP ambiguity resolution)反演 PWV 的性能,选取全球范围 16 个 MGEX 站 2022 年 4 个时段的观测数据,采用最终精密星历解算,设置不同星座组合(GPS, BDS-3, GPS+BDS-3, GPS+GLO+GAL+BDS-3)获取对流层延迟(zenith total delay, ZTD)估值,并转换为 PWV。从 PPP-ZTD 与 IGS-ZTD 的相关性、PPP-ZTD 收敛时间、ZTD 估值精度和 PPP-PWV 估值精度 4 个方面评价多模 PPP-AR 探测水汽的性能。结果表明,与单(G、C)、双系统(GC)固定解相比,多系统(GREC)固定解获取 ZTD 估值更加精确,相关系数更高。相较于单、双系统,多系统具有更快的收敛速度,收敛时间分别缩短了 27%, 25% 和 20%, 多系统固定解与浮点解相比收敛时间缩短 11%。此外,对 GNSS PPP 反演的 PWV 与探空站 PWV(RS-PWV)进行对比,结果表明, WUH2 站与 HOB2 站单、双、多系统固定解、多系统浮点解(float-GREC)的平均均方根误差分别为 6.40 mm, 6.48 mm, 6.19 mm, 6.17 mm, 6.19 mm 和 5.82 mm, 5.77 mm, 5.72 mm, 5.62 mm, 5.70 mm。多模下得到的 PWV 估值精度最高,可为高精度的水汽反演提供支持。

**关键词:**GNSS; 北斗三号; 精密单点定位; 对流层延迟; 大气可降水量

**中图分类号:**P228.4 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-8110(2023)06-0093-10

## Performance analysis of atmospheric water vapor detection based on multi-constellation PPP-AR technology

GUO Qiuying<sup>1</sup>, XUE Xuelong<sup>1</sup>, YU Miao<sup>1</sup>, ZHANG Haiping<sup>2</sup>, LI Guowei<sup>2</sup>, BI Jingxue<sup>1</sup>

(1. School of Surveying and Geo-Information, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Shandong Institute of Land Surveying and Mapping, Jinan 250102, China)

**Abstract:** Precise point positioning (PPP) to retrieve precipitable water vapor (PWV) has the advantages of high accuracy, strong real-time performance, and can play an important role in terms of disaster monitoring, rainfall forecasting and detecting rainfall information. In order to evaluate the performance of PPP ambiguity resolution (PPP-AR) inversion of PWV, observation data from 16 MGEX stations around the world for four periods in 2022 are selected, and the final precise ephemeris is used for calculation, and different constellation combinations (GPS, BDS-3, GPS+BDS-3, GPS+GLO+GAL+BDS-3) are set to obtain zenith total delay (ZTD) valuation and the inversion of PWV. The water vapor detection performance of multi-constellation PPP-AR is evalu-

**收稿日期:**2023-06-13; **修订日期:**2023-09-19

**基金项目:**山东省自然科学基金(ZR2021QD155, ZR2017MD029, ZR202103020231, ZR2022MD103); 大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金(SKLG2021-5-5)

**作者简介:**郭秋英(1970-),女,博士,教授,主要从事 GNSS 精密定位数据处理、北斗/GNSS/InSAR 气象学方面的研究。

ated from four aspects: the correlation between PPP-ZTD and IGS-ZTD, the convergence time of PPP-ZTD, the estimation accuracy of ZTD and the estimation accuracy of PPP-PWV. The results show that compared with single(G, C) and dual system (GC) fixed solutions, the multi-constellation (GREC) fixed solution obtains ZTD estimation more accurately and has a higher correlation coefficient. Compared with single and dual systems, the multi-constellation has faster convergence speed, and the convergence time is shortened by 27%, 25% and 20% respectively. The multi-constellation fixed solution has a convergence time shortened by 11% compared with the floating-point solution. In addition, the comparison of PWV and Radiosondes PWV (RS-PWV) retrieved by GNSS PPP shows that the mean root mean square errors of the single system (G, C), dual system (GC), multi-constellation fixed solution (GREC) and multi-constellation floating-point solution (float-GREC) of the WUH2 station are 6.40 mm, 6.48 mm, 6.19 mm, 6.17 mm, 6.19 mm, respectively; and those of the HOB2 station are 5.82 mm, 5.77 mm, 5.72 mm, 5.62 mm and 5.70 mm, respectively. The PWV estimation accuracy obtained in multi-constellation is the highest, which can support high-precision water vapor inversion.

**Key words:** Global navigation satellite system; BeiDou navigation satellite system with global coverage (BDS-3); Precise point positioning; Zenith total delay; Precipitable water vapor

## 0 引言

大气中水汽含量虽然很少,却是大气中最活跃的成分之一<sup>[1]</sup>。大气水汽的时空变化是灾害性气候形成的原因之一。因此,快速、精确地获取大气水汽对于气象预报具有重要的意义<sup>[2]</sup>。

全球卫星导航系统(global navigation satellite system,GNSS)具有高时间分辨率、高精度和全天候的探测大气水汽能力,弥补了传统水汽探测技术的不足,成为探测水汽的重要技术手段。地基GNSS反演大气可降水量(precipitable water vapor,PWV)主要有相对定位和精密单点定位(precise point positioning,PPP)两种模式,都能得到精度较高的对流层延迟(zenith total delay,ZTD)<sup>[3]</sup>。相对定位需要引入远距离测站进行联合解算,才能有效消除大部分GNSS观测误差,从而提高GNSS反演PWV的精度。而PPP不需引入远距离测站进行解算,具有成本低、效率高及处理快等优势<sup>[4]</sup>。此外,整周模糊度固定模式下的PPP(PPP ambiguity resolution,PPP-AR)技术的发展使得PPP收敛时间进一步缩短<sup>[5]</sup>,从而实现PWV估值精度的提升。

目前,世界上有四个全球卫星导航系统,包括中国的北斗(BeiDou navigation satellite system,BDS)、美国的GPS、俄罗斯的GLONASS和欧盟的伽利略(Galileo),这些系统相互兼容、相互发展。利用多模GNSS组合可以增加观测卫星数量,从而提高ZTD

解算精度<sup>[6]</sup>。李星星等<sup>[7]</sup>使用单系统GNSS和多系统GNSS估计ZTD,实验表明,与单一GNSS相比,多模GNSS实时ZTD估计可以实现毫米级的精度和高可靠性。LU<sup>[8]</sup>基于多GNSS(GLONASS+GPS+伽利略+北斗),利用当前GNSS的所有可用观测结果,得到实时的ZTD/PWV估值,可以实现毫米级的精度。李宏达等<sup>[9]</sup>利用GPS/BDS/GLONASS/Galileo组合获取PWV估值,实验表明,多系统组合PPP估计ZTD的初始化时间缩短,且能够获取更高精度的ZTD和PWV。胡鹏<sup>[10]</sup>利用实时PPP技术,分析了GNSS四系统反演水汽的精度差异,结果显示,不同系统得到的ZTD/PWV结果存在明显的差异,多系统组合观测获取的水汽序列结果最为稳健,但没有对北斗三号获取的PWV进行评估。夏鹏飞等<sup>[11]</sup>基于GNSS观测数据与ERA-5资料,构建对流层模型;新的ZTD模型优于后处理GNSS-ZTD估值,研究表明,对浮点PPP求解施加ZTD约束后,垂直方向的收敛时间也有显著的改善。

以上研究结果表明,与单一或双系统相比,多系统组合显著提高了PWV解算精度。由于北斗三号的B1C/B2a相较于其他频点具有更好的信号强度<sup>[12]</sup>,因此本文在利用北斗探测水汽时选择B1C/B2a频点。此外PPP-AR在传统PPP的基础上加入了模糊度固定的方法,可以提高定位精度和缩短收敛时间。因此本文基于最终精密星历、采用不同方案下获取ZTD并进一步转换为PWV,从PPP-

ZTD 与 IGS-ZTD 的相关性、PPP-ZTD 的收敛时间、PPP-ZTD 的精度以及 PPP-PWV 的精度 4 个方面评价 PPP-AR 探测大气水汽的性能,对于 GNSS 气象学应用具有重要的意义。

## 1 PPP 反演大气水汽的原理与方法

### 1.1 PPP 基本观测模型

GNSS PPP 中伪距和载波相位观测方程可表示为

$$\begin{cases} P_j^{s,G} = \rho^{s,G} + c dt_r - c dt^{s,G} + d_0 + t_{STD} + \\ \quad \gamma_j I_i^{s,G} + c(d_{r,j} - d_j^s) + \xi_{P_j}^{s,G} \\ P_j^{s,C} = \rho^{s,C} + c dt_r - c dt^{s,C} + d_0 + t_{STD} + \\ \quad \gamma_j I_i^{s,C} + c(d_{r,j} - d_j^s) + \xi_{P_j}^{s,C} \\ P_j^{s,R} = \rho^{s,R} + c dt_r - c dt^{s,R} + d_0 + t_{STD} + \\ \quad \gamma_j I_i^{s,R} + c(d_{r,j} - d_j^s) + \xi_{P_j}^{s,R} \\ P_j^{s,E} = \rho^{s,E} + c dt_r - c dt^{s,E} + d_0 + t_{STD} + \\ \quad \gamma_j I_i^{s,E} + c(d_{r,j} - d_j^s) + \xi_{P_j}^{s,E} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} L_j^{s,G} = \rho^{s,G} + c dt_r - c dt^{s,G} + d_0 + t_{STD} - \\ \quad \gamma_j I_i^{s,G} + \lambda_j (N_j^{s,G} + b_{r,j} - b_j^{s,G}) + \xi_{L_j}^{s,G} \\ L_j^{s,C} = \rho^{s,C} + c dt_r - c dt^{s,C} + d_0 + t_{STD} - \\ \quad \gamma_j I_i^{s,C} + \lambda_j (N_j^{s,C} + b_{r,j} - b_j^{s,C}) + \xi_{L_j}^{s,C} \\ L_j^{s,R} = \rho^{s,R} + c dt_r - c dt^{s,R} + d_0 + t_{STD} - \\ \quad \gamma_j I_i^{s,R} + \lambda_j (N_j^{s,R} + b_{r,j} - b_j^{s,R}) + \xi_{L_j}^{s,R} \\ L_j^{s,E} = \rho^{s,E} + c dt_r - c dt^{s,E} + d_0 + t_{STD} - \\ \quad \gamma_j I_i^{s,E} + \lambda_j (N_j^{s,E} + b_{r,j} - b_j^{s,E}) + \xi_{L_j}^{s,E} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $P_j, L_j$  分别表示伪距和载波相位观测量;上标  $s$  为观测的卫星号;G, C, R, E 分别表示 GPS, BDS, GLONASS 和 Galileo;下标  $j$  为载波的频率;  $\rho^s$  为卫星  $s$  至接收机的几何距离;  $c$  为真空中光速;  $dt_r, dt^s$  分别为接收机和卫星钟差;  $d_0$  为卫星轨道误差;  $t_{STD}$  为对流层斜路径延迟;  $\gamma_j I_i^s$  为电离层延迟;  $d_{r,j}, d_j^s$  分别为接收机端和卫星端的伪距硬件延迟;  $b_{r,j}, b_j^s$  分别为接收机端和卫星端载波相位硬件延迟;  $\xi_{P_j}^s$  为伪距观测值残差;  $\xi_{L_j}^s$  为载波相位观测噪声和其他误差。

BDS-3 中 B1I/B3I 伪距偏差可以通过无电离层组合消除,而 BDS-3 中 B1C/B2a 无法消除,为了进行改正,可以使用差分码偏差(differential code bias, DCB)产品进行改正,公式为<sup>[13]</sup>

$$\begin{cases} \bar{P}_{r,B1C}^s = P_{r,B1C}^s - \alpha_{12} t_{DCB_{B1C,B11}^s} - \beta_{12} t_{DCB_{B1C,B31}^s} \\ \bar{P}_{r,B2a}^s = P_{r,B2a}^s - \alpha_{12} t_{DCB_{B2a,B11}^s} - \beta_{12} t_{DCB_{B2a,B31}^s} \end{cases} \quad (3)$$

在 PPP 解算中,由于未检校的相位延迟(unca-

librated phase delay, UPD)被模糊度吸收,导致模糊度不具备整数特性,无法直接固定为整数。因此,精确地将相位偏差进行分离并改正是实现 PPP 模糊度固定的关键,目前通常采用整数钟差法或 UPD 法来消除相位偏差带来的影响。

### 1.2 模糊度固定方法

#### 1.2.1 宽巷模糊度固定

模糊度固定一般采用宽窄巷(wide lane-narrow lane, WL-NL)的一个固定的过程<sup>[14]</sup>, melbourne-wubbena(MW)组合观测值可以转换为

$$L_{MW}^s = \lambda_{WL} N_{WL} + B_{r,WL} + B_{WL}^s + \zeta_{WL}^s \quad (4)$$

式中,  $L_{MW}^s$  为 MW 组合观测值;  $\lambda_{WL}$  为宽巷波长;  $N_{WL}$  为宽巷模糊度;  $B_{r,WL}$  为接收机端宽巷偏差;  $B_{WL}^s$  为卫星端宽巷偏差。

为了避免伪距噪声的影响,在计算  $L_{MW}^s$  时需要伪距载波观测值进行平滑处理。具体如下

$$\begin{cases} \bar{N}_{WL}^s(k) = \bar{N}_{WL}^s(k-1) + \\ \quad \frac{1}{k} [N_{WL}^s(k) - \bar{N}_{WL}^s(k-1)] \\ \sigma_{N_{WL}^s}^2(k) = \sigma_{N_{WL}^s}^2(k-1) + \frac{1}{k} [(N_{WL}^s(k) - \\ \quad \bar{N}_{WL}^s(k-1))^2 - \sigma_{N_{WL}^s}^2(k-1)] \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\bar{N}_{WL}^s$  为宽巷模糊度的历元平滑值;  $k$  和  $k-1$  分别为当前和前一个观测历元;  $\sigma_{N_{WL}^s}^2$  为宽巷模糊度的平滑方差。

对平滑后的宽巷模糊度进行星间单差计算,首先,根据宽巷模糊度固定残差和高度角的关系,选择高度角最大的卫星作为基准星,通过计算得到星间单差宽巷模糊度。然后,对星间单差模糊度取整,在进行取整前后,宽巷模糊度的绝对值差值不大于 0.25,则进一步进行下列验证

$$P = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{i - |\tilde{N} - \bar{N}|}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \operatorname{erfc} \left( \frac{i + |\tilde{N} - \bar{N}|}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \quad (6)$$

其中

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\pi} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (7)$$

式中,  $P$  表示模糊度固定成功率;  $\tilde{N}$  为星间单差模糊度的实数解;  $\bar{N}$  为单差模糊度整数解;  $\sigma$  为求得的模糊度中误差。

#### 1.2.2 窄巷模糊度固定

经过宽巷模糊度固定后,开始进行窄巷模糊度

固定。根据估计的模糊度实数解和星间单差宽巷模糊度可以得出星间窄巷模糊度实数解,公式如下

$$\hat{N}_1 = \frac{\bar{N}_{\text{IF}}^{\text{sl}} - \bar{N}_{\text{IF}}^{\text{s2}} - \frac{\lambda_1^2}{\lambda_2^2 - \lambda_1^2} \bar{N}_{\text{WL}}^{\text{sl2}}}{\lambda_{\text{NL}}} \quad (8)$$

式中,  $\hat{N}_1$  为星间单差窄巷实数解;  $\bar{N}_{\text{IF}}^{\text{sl}}$  与  $\bar{N}_{\text{IF}}^{\text{s2}}$  分别为两颗卫星的模糊度实数解,下标 IF 表示无电离层影响;  $\bar{N}_{\text{WL}}^{\text{sl2}}$  为星间单差模糊度宽巷值;  $\lambda_{\text{NL}}$  为窄巷波长,约为 0.1 m。

其对应的协方差阵为

$$\mathbf{Q}_{\bar{N}_{\text{NL}}^{\text{sl2}}} = \frac{1}{\lambda_{\text{NL}}^2} \mathbf{Q}_{\bar{N}_{\text{IF}}^{\text{sl2}}} \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{Q}_{\bar{N}_{\text{NL}}^{\text{sl2}}}$  为窄巷模糊度方差协方差矩阵;  $\mathbf{Q}_{\bar{N}_{\text{IF}}^{\text{sl2}}}$  为星间单差无电离层组合模糊度的方差协方差矩阵。

在 LAMBDA 算法中,精密单点定位的窄巷模糊度搜索时,其输入量分别为浮点解参数个数、固定解参数个数、具有整数特性的实数解、对应的协方差矩阵以及固定解和固定解的残差平方和。整数最小二乘被认为是模糊度取整方法中最严谨的方法,获取的解为最优解。一般将最优解和次优解进行 Ratio 检验

$$\frac{\|\bar{\mathbf{a}} - \tilde{\mathbf{a}}_2\|_Q^2}{\|\bar{\mathbf{a}} - \tilde{\mathbf{a}}_1\|_Q^2} = \frac{R_1}{R_2} \geq C \quad (10)$$

式中,  $\bar{\mathbf{a}}$  为具有整周模糊度特性的浮点模糊度矢量;  $\tilde{\mathbf{a}}_1, \tilde{\mathbf{a}}_2$  分别为最优解和次优解模糊度整数解候选矢量;  $R_1, R_2$  表示模糊度整数解残差的二次型(1,2 分别表示次优解和最优解);  $C$  为阈值,一般取  $C=2$  或 3,式(10)作为整数解是否为模糊度真值的检验条件。当  $C \geq 3$  时,认为模糊度固定成功。

### 1.3 PPP 水汽反演的原理

斜路径对流层延迟(slant total delay, STD)可以由映射函数、水平梯度、干延迟(zenith hydrostatic delay, ZHD)与湿延迟(zenith wet delay, ZWD)构成

$$t_{\text{STD}} = M_d Z_h + M_w Z_w + \Delta L_g(e, a) \quad (11)$$

式中,  $M_d$  为 ZHD 映射函数;  $M_w$  为 ZWD 映射函数;  $\Delta L_g(e, a)$  为大气在水平方向梯度变化引起的误差;  $e$  为卫星的截止高度角;  $a$  为卫星的方位角。

一般采用 Saastamoinen 模型来计算 ZHD

$$t_{\text{ZHD}} = \frac{(2.2779 \pm 0.0024)}{1 - 0.00266 \times (2\varphi) - 0.00028 \times H} \times p \quad (12)$$

式中,  $p$  为测站下气压,单位为 hPa;  $H$  为测站高

度,单位为 m;  $\varphi$  为以弧度为单位的纬度。

GNSS 卫星信号 STD 映射到观测站的天顶方向上得到 ZTD, ZTD 减去 ZHD 可以得到 ZWD, 然后利用 ZWD 与 PWV 的转换关系获得 PWV。1994 年, Bevis 等<sup>[15]</sup> 给出了 ZWD 到 PWV 的转换公式,计算方法为

$$t_{\text{PWV}} = \Pi \cdot t_{\text{ZWD}} \quad (13)$$

$$\Pi = \frac{1 \times 10^6}{\rho R_v \left[ \left( \frac{k_3}{T_m} \right) + k_2' \right]} \quad (14)$$

式中,  $\Pi$  为水汽转换系数;  $\rho$  为液态水密度;  $k_1 = 77.604 \text{ K/hPa}$ ,  $k_2 = 64.790 \text{ K/hPa}$ ,  $k_3 = 3.776 \times 10^5 \text{ K}^2/\text{hPa}$  分别为大气折射率试验常数;  $k_2' = k_2 - k_1 \frac{R_d}{R_v} = 16.52$ ;  $R_v = 0.462 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  为水汽气体常数;  $R_d = 0.287 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  为干空气气体常数;  $T_m$  为大气加权平均温度。其中  $T_m$  采用 Bevis 经验公式。基于上述方法就可以获取测站上方的 PWV。

## 2 基于 PPP-AR 获取 ZTD, PWV 的性能分析

### 2.1 数据获取与实验方案

为评估多模 PPP-AR 在反演水汽方面的能力,选取全球范围 16 个 MGEX 观测站,2022 年 3 月 11 日到 3 月 17 日(年积日 70—76)、5 月 7 日到 5 月 13 日(年积日 126—132)、7 月 8 日到 7 月 14 日(年积日 189—195)、10 月 23 日到 10 月 29 日(年积日 294—300)4 个时间段的观测数据。采用 GPS(G)、BDS-3(C)、GPS+BDS-3(GC)、GPS+GLO+GAL+BDS-3(GREC)以及多系统浮点解(float-GREC)五种方案对 ZTD 与 PWV 进行估值,其中 GPS 采用 L1/L2, BDS-3 采用 B1C/B2a, GLONASS 采用 L1/L2, Galileo 采用 E1/E5a 双频频点,前四种方案为 PPP-AR,最后方案为多系统浮点解。实验选取全球范围 16 个 MGEX 观测站分布图见图 1。

实验采用武汉大学 IGS 数据中心提供的最终精密星历产品。该产品具有较高的精度和时效性,可用于水汽的探测。本文使用 Net\_Diff 1.16 软件进行解算,该软件能够支持所有 GNSS 系统和所有频率信号、GNSS 观测数据和产品下载、双频和三频 PPP 与 PPP-AR 的解算等;且在数据处理过程中,该软件可以更加直观地选择不同的频点及其组合。具体解算策略如表 1 所示。

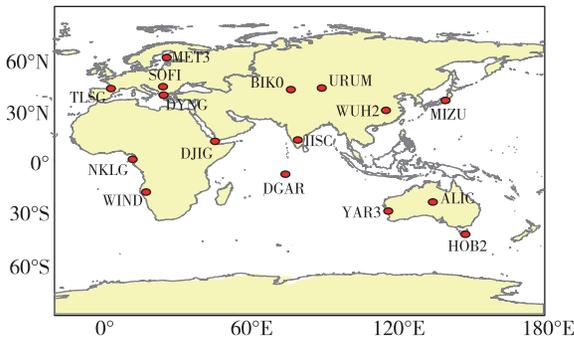


图 1 全球范围 16 个 MGEX 观测站分布图

Fig. 1 Distribution map of 16 MGEX observation stations around the world

表 1 数据解算策略

Tab. 1 Data solution strategy

参数	处理策略
处理方式	PPP, PPP-AR
频点	G; L1&L2; C; B1C&B2a; R; L1&L2; E; E1&E5a
处理方案	G, C, GC, GREC, float-GREC
观测量	载波相位/测距伪码观测量
采样间隔	30 s
天线相位中心改正	IGS_14 模型
卫星轨道、钟差	WUM 分析中心
PCO, PCV	ATX 文件改正
观测值定权	高度角定权
周跳探测	GF+MW 组合探测
对流层延迟先验值	Saastamoinen+ GPT_5W <sup>[16]</sup>
映射函数	VMF3
截止高度角	7°
参数估计方法	抗差卡尔曼滤波

自 1998 年以来,国际 GNSS 服务(international GNSS service, IGS)采用地面观测站数据并结合最终精密卫星轨道、卫星截止高度角为 7°,基于 PPP 技术获取每日时间分辨率为 5 min 的 ZTD 产品,精度约为 4 mm<sup>[17]</sup>。这些对流层产品以每日文件的形

式提供,覆盖了 IGS 网络中的 350 多个全球导航卫星系统(GNSS)站点。因此,一般将 IGS-ZTD 作为参考值。

## 2.2 多模 GNSS 探测水汽的性能分析

为分析多模 PPP-AR 在探测水汽方面的性能,对不同时间段和不同卫星组合获取 ZTD 与 PWV 的估值进行了比较。从 PPP-ZTD 与 IGS-ZTD 的相关性、PPP-ZTD 收敛时间、PPP-ZTD 估值精度及 PPP-PWV 估值精度 4 个方面评价多模 PPP-AR 探测水汽的性能。

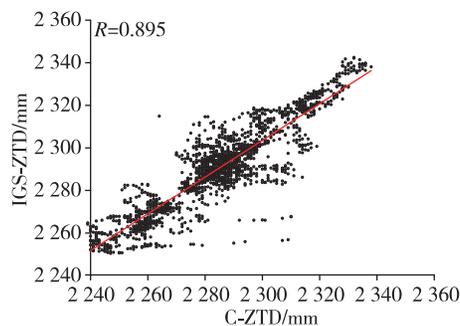
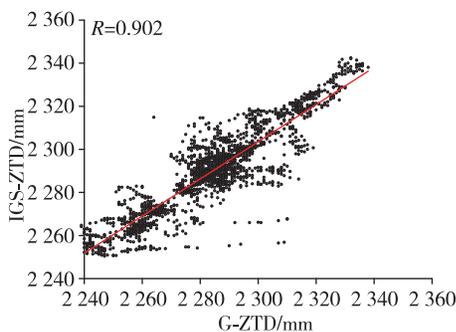
### 2.2.1 GNSS PPP-ZTD 与 IGS-ZTD 的相关性分析

以 IGS 发布的对流层产品(IGS-ZTD)作为参考值,评估不同方案下得到 ZTD 估值与 IGS-ZTD 的相关性。图 2 展示了 2022 年 3 月 11 日到 3 月 17 日(年积日 70—76)ALIC 测站 5 种方案下获取 ZTD 估值与 IGS-ZTD 值的相关性。

由图 2 可以看出,单系统获取 ZTD 与 IGS-ZTD 的相关系数(0.902)与单系统 C 双频 B1C/B2a 的相关系数(0.895),两者相关系数相当。双系统 GC 相关系数(0.936)高于单系统 G 和单系统 C 双频 B1C/B2a 的相关系数。这表明使用两个卫星系统进行组合可以提高相关性。此外,多系统的相关系数(0.938)比双系统的相关系数更高,意味着使用更多卫星系统进行组合时,相关性会进一步增强。相较于 float-GREC 组合, GREC 也展示了更好的相关性。

### 2.2.2 GNSS PPP-ZTD 收敛时间分析

以 IGS 发布的对流层产品(IGS-ZTD)作为参考值,评估 ZTD 序列的收敛时间。当 GNSS PPP-ZTD 与 IGS-ZTD 差值小于 20 mm,并且连续 20 个历元差值保持在 20 mm 内,认为收敛完成,这个过程需要的时间称为收敛时间。图 3 为 DGAR 测站 4 个不同时间段、5 种方案下的收敛时间。



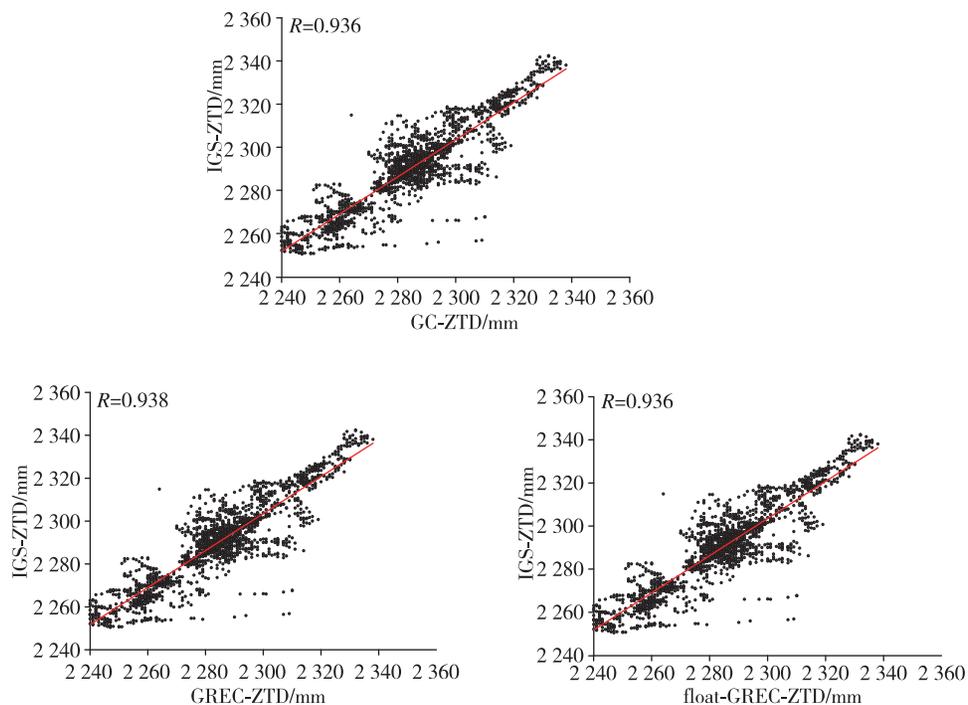
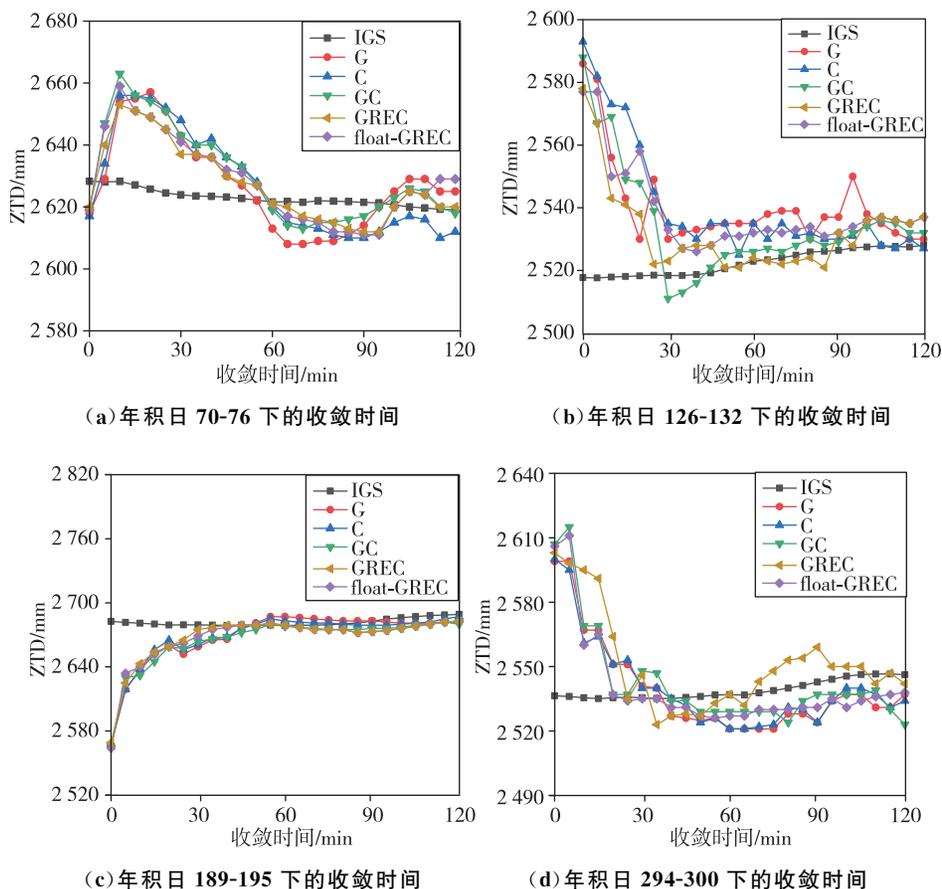


图 2 ALIC 测站不同星座组合的相关性

Fig. 2 Correlation of different constellation combinations of ALIC stations



(a) 年积日 70-76 下的收敛时间

(b) 年积日 126-132 下的收敛时间

(c) 年积日 189-195 下的收敛时间

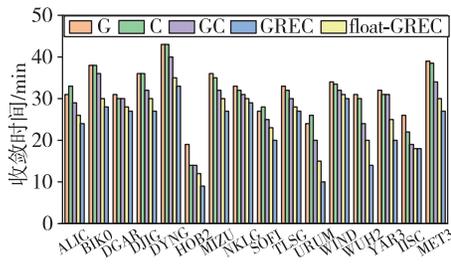
(d) 年积日 294-300 下的收敛时间

图 3 DGAR 测站不同时间段、不同组合下的收敛时间

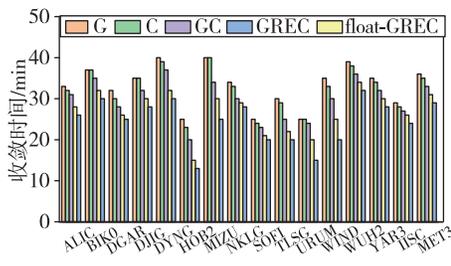
Fig. 3 Convergence time of DGAR station under different time periods and combinations

图 3 显示了 DGAR 测站 4 个不同时间段的收敛过程。在 PPP 收敛的过程中,刚开始各方案的初始 ZTD 与 IGS-ZTD 之间存在较大的差值,随着时间的推移,GNSS PPP-ZTD 与 IGS-ZTD 之间的差值逐渐减小,并且变化趋势逐渐趋于一致。可以看出,双系统的收敛时间小于单系统的收敛时间,而多系统的收敛时间更加迅速,固定解在浮点解的基础之上实现了更加迅速的收敛。多系统 PPP 具有更好的收敛性能,可显著提高 ZTD 估计的准确性和稳定性。通过融合多个系统的信息,组合 PPP 可以更快地获取 ZTD 的估值。为了更加直观体现测站的收敛时间,统计了所有测站不同时间段下的收敛时间,如图 4 所示。

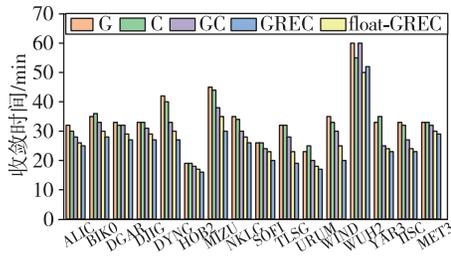
由图 4 可以看出,在 4 个不同时间段的测站中,基于最终精密星历获取的单系统 G 和 C 双频 B1C/B2a 的平均收敛时间分别为 32,33,34,33 和 31,32,



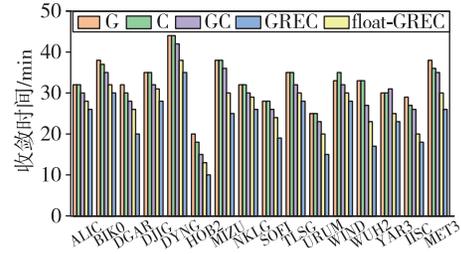
(a) 年积日 70—76 下的收敛时间



(b) 年积日 126—132 下的收敛时间



(c) 年积日 189—195 下的收敛时间



(d) 年积日 294—300 下的收敛时间

图 4 不同时间段各测站平均收敛时间

Fig. 4 Average convergence time of each station in different time periods

34,32 min,双系统 GC 的平均收敛时间分别为 29,30,31 和 30 min,多系统固定解 GREC 平均收敛时间分别为 23,23,26 和 24 min,多系统浮点解 GREC 平均收敛时间分别为 26,27,28,27 min。根据研究数据表明:与 G,C,GC 相比,多系统固定解 GREC 的收敛时间分别缩短了 27%,25%和 20%。此外,多系统固定解相比于多系统浮点解的收敛时间缩短 11%。

这些收敛时间表明多系统固定解 GREC 在不同时间段的收敛速度较快,相较于单系统和双系统组合,具有更高的效率和性能。由于多系统在单、双系统的基础之上获得了更多的卫星数量,观测几何图形也得到了改进。这有助于 PPP 的收敛,进而改善 ZTD 的收敛时间和 PWV 估值精度。而多系统浮点解也表现出一定的优势,虽不如多系统固定解 GREC 的收敛速度快,但相较于单系统 G 和 C 固定解仍有改进。因此,多系统 PPP-AR 技术在大气水汽探测中表现出显著的优势。

### 2.2.3 GNSS PPP 反演的 ZTD 精度分析

为分析不同时间段、不同星座组合下的 ZTD 估值精度,选取了 ALIC,BIK0 两个测站,分别计算了不同方案下获取的 ZTD 估值与对应参考值 IGS-ZTD 之间的偏差。以平均偏差和均方根误差作为精度评价指标,ALIC,BIK0 测站不同时间段、不同星座组合 ZTD 精度对比见表 2。

表 2 统计了 ALIC 与 BIK0 测站在不同时间段、不同星座组合下的 ZTD 精度,GREC 组合获得的 ZTD 估值性能比单、双系统有所提高,能够获得更高精度的 ZTD 估值。可见,与单系统和双系统解算相比,多系统 PPP 解算 ZTD 估值精度更高。

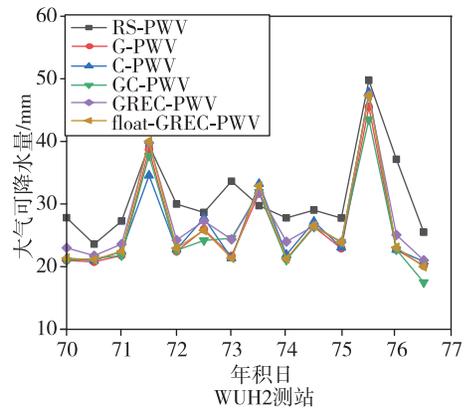
表 2 ALIC, BIK0 测站不同时间段、不同星座组合 ZTD 精度对比

Tab. 2 Comparison of ZTD accuracy of ALIC and BIK0 stations in different time periods and constellation combinations

		2022 年不同时间段精度评价							
		年积日(070—076)		年积日(126—132)		年积日(189—195)		年积日(294—300)	
测站	实验方案	平均偏差	均方根误差	平均偏差	均方根误差	平均偏差	均方根误差	平均偏差	均方根误差
ALIC	G	6.08	10.56	5.04	9.90	4.87	7.15	7.23	10.94
	C	6.49	10.33	5.23	9.95	5.02	7.52	7.50	11.50
	GC	4.80	9.85	4.64	8.55	4.08	6.76	7.30	10.33
	GREC	4.79	7.45	3.99	8.13	3.81	6.68	6.04	9.56
	float-GREC	4.80	9.55	4.57	8.30	4.00	6.73	7.05	10.02
BIK0	G	5.44	7.54	5.82	8.78	6.05	10.47	5.14	5.84
	C	5.85	9.17	5.80	8.75	8.51	9.58	5.32	5.90
	GC	5.11	7.47	5.74	8.34	6.07	9.58	3.97	5.66
	GREC	4.85	6.70	5.28	7.18	5.32	7.85	3.72	4.95
	float-GREC	5.03	7.45	5.53	8.14	6.01	8.94	3.83	5.44

2.2.4 GNSS PPP 反演 PWV 的性能分析

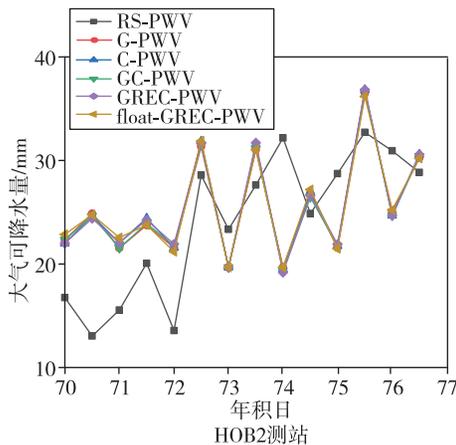
以探空站 PWV(radiosondes precipitable water vapor, RS-PWV)为参考值,对上述 5 种方案反演的 PWV 精度进行分析。由于探空站每天只有两个时段(UTC 时间 00.00 和 12.00)的数据,因此在分析时只保留与探空站时段一致的 PWV。另外, HOB2 站与探空站(编号 94975)相距 25.1 km, WUH2 与探空站(编号 57494)相距 5.2 km,且对流层延迟具有较强的时空差异性,故分析时只采用这两个站的 PWV。5 种方案获得 HOB2 测站的 PWV 与探空站 94975 获取的 PWV 对比见图 5(a);5 种方案获得 WUH2 测站的 PWV 与探空站 57494 获取的 PWV 对比见图 5(b)。



(b) WUH2 测站与探空站对比

图 5 HOB2 和 WUH2 站与探空站(编号 94975,57494)对比

Fig. 5 Comparison of HOB2 and WUH2 stations with sounding stations (No. 94975,57494)



(a) HOB2 测站与探空站的对比

由图 5 可知,G,C,GC,GREC,float-GREC 这 5 种方案得到 PWV 与 RS-PWV 之间的差值大部分在 10 mm 之内,GREC 组合获取的 PWV 整体的变化更趋向于 RS-PWV。以探空站 RS-PWV 为参考值,5 种方案计算的 WUH2 和 HOB2 站的 PWV 与其相应的探空站 PWV 的均方根误差见表 3。

由表 3 可知,相较于单系统(G)固定解、单系统(C)固定解、双系统固定解及多系统浮点解,多系统固定解获取 PWV 估值展示了更好的性能。WUH2 和 HOB2 测站双系统 GC 解算均方根误差较单系统 G,C 双频 B1C/B2a 减少 0.21 mm,0.29 mm 和 0.10 mm,

表 3 WUH2 与 HOB2 站 PWV 的精度对比  
Tab. 3 Comparison of PWV accuracy between WUH2 and HOB2 stations

WUH2		HOB2	
解算方案	均方根误差	解算方案	均方根误差
G	6.40	G	5.82
C	6.48	C	5.77
GC	6.19	GC	5.72
GREC	6.17	GREC	5.62
float-GREC	6.19	float-GREC	5.70

0.05 mm;相较于 GC 组合,GREC 组合的 PWV 精度进一步提升,WUH2 和 HOB2 测站均方根误差减少 0.02 mm 和 0.10 mm;相较于 float-GREC 组合,GREC 组合精度也有所提升,WUH2 测站均方根误差减少 0.02 mm,HOB2 测站均方根误差减少 0.08 mm。

### 3 结论

本文通过研究多模 PPP-AR 技术反演大气水汽的性能,得到如下结论。

1)在相关性方面:多系统组合 ZTD 估值与 IGS-ZTD 值相关性最高,时间序列更加稳健、平滑。此外,GREC 组合估计 ZTD 值更加连续、可靠。

2)在收敛时间方面:在不同的时间段基于最终精密星历获取 ZTD,多系统展示了更快的收敛速度,相较于单、双系统收敛时间分别缩短了 27%,25%和 20%。多系统固定解相较于多系统浮点解,收敛时间缩短了 11%,表现出良好的性能。

3)在 ZTD 精度方面:以平均偏差和均方根误差作为精度评价指标,发现多系统状态下精度最高,由于 GREC 组合可观测到更多的卫星和更好的空间结构,由此可改善 ZTD 的精度。

4)在 PWV 精度方面:基于北斗三号双频 B1C/B2a 反演的 PWV 与 GPS 的精度相当,基于多系统组合 PPP-AR 反演的 PWV 与探空站 PWV 最为接近,效果最好。

以上结果表明,在水汽探测方面,北斗三号双频 B1C/B2a 获取 PWV 估值与 GPS 效果相当,在多系统的状态下性能更佳,可以获得更高精度的 PWV 估值,为高精度的天气预报提供有利的参考数据。

### 参考文献

[1] 吴昊,鄂盛龙,夏朋飞,等. 联合地基 GNSS 及空基

GNSS 掩星探测水汽三维分布[J]. 导航定位与授时, 2020,7(1):92-97.

WU Hao, E Shenglong, XIA Pengfei, et al. Combined ground-based GNSS and space-based GNSS occultation to detect three-dimensional distribution of water vapor [J]. Navigation Positioning and Timing, 2020,7(1): 92-97 (in Chinese).

[2] 金双根,汪奇生,史奇奇. 单频到五频多系统 GNSS 精密单点定位参数估计与应用[J]. 测绘学报,2022, 51(7):1239-1248.

JIN Shuanggen, WANG Qisheng, SHI Qiqi. Parameters estimation and applications from single to five frequency multi-GNSS precise point positioning [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7):1239-1248(in Chinese).

[3] 张克非,李浩博,王晓明,等. 地基 GNSS 大气水汽探测遥感研究进展和展望[J]. 测绘学报,2022,51(7): 1172-1191.

ZHANG Kefei, LI Haobo, WANG Xiaoming, et al. Recent progresses and future prospectives of ground-based GNSS water vapor sounding [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1172-1191(in Chinese).

[4] CHEN H, LIU X X, JIANG W P, et al. Preliminary analysis and evaluation of BDS-2/BDS-3 precise point positioning[J]. Advances in Spiration Research, 2021,68 (10):4113-4128.

[5] YU C, ZHANG Y Z, CHEN J P, et al. Performance assessment of multi-GNSS real-time products from various analysis centers[J]. Remote Sensing, 2023, 15(1):140.

[6] 赵琳,李宏宇,侯毅男,等. 多系统混频非差非组合精密单点定位方法研究[J]. 导航定位与授时,2021,8 (5):96-102.

ZHAO Lin, LI Hongyu, HOU Yinan, et al. Research on undifferenced and uncombined precise point positioning method of multi-system and mixing frequency[J]. Navigation Positioning and Timing, 2021,8(5):96-102 (in Chinese).

[7] LI X X, DICK G, LU C X, et al. Multi-GNSS meteorology: Real-time retrieving of atmospheric water vapor from BeiDou, Galileo, GLONASS and GPS observations [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015,53(12):6385-6393.

[8] LU C X. Real-time sensing of atmospheric water vapor from multi-GNSS constellations[D]. Berlin: Technische Universität Berlin, 2016.

[9] 李宏达,张显云,廖留峰,等. 利用 GPS/BDS/GLO-

- NASS/Galileo 组合 PPP 反演大气可降水量[J]. 测绘通报, 2020(6):63-66+98.
- LI Hongda, ZHANG Xianyun, LIAO Liufeng, et al. Retrieval of precipitable water vapor by using combined GPS/BDS/GLONASS/Galileo PPP method [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(6):63-66+98(in Chinese).
- [10] 胡鹏. 基于多模 PPP 技术的地基 GNSS 水汽反演研究[D]. 西安:长安大学, 2019.
- HU Peng. Research on ground-based GNSS water vapor inversion based on multi-mode PPP technology [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019(in Chinese).
- [11] XIA P F, TONG M X, YE S R, et al. Establishing a high-precision real-time ZTD model of China with GPS and ERA5 historical data and its application in PPP[J]. GPS Solutions, 2022, 27(1):2.
- [12] WANG E S, SONG W, ZHANG Y Z, et al. Evaluation of BDS/GPS multi-frequency RTK positioning performance under different baseline lengths[J]. Remote Sensing, 2022, 14(15):3561.
- [13] YUE C Y, DANG Y M, XUE S Q, et al. A new optimal subset selection method of partial ambiguity resolution for precise point positioning[J]. Remote Sensing, 2022, 14(19):4819.
- [14] YU D Y, JI B, LIU Y, et al. Performance assessment of RTPPP positioning with SSR corrections and PPP-AR positioning with FCB for multi-GNSS from MADOCA products[J]. Advances in Space Research, 2023, 71(6):2924-2937.
- [15] BEVIS M, BUSINGER S, HERRING T A, et al. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1992, 97(D14):15787-15801.
- [16] WANG E S, YANG T, WANG Z, et al. Performance evaluation of precise point positioning for BeiDou-3 B1c/B2a signals in the global range[J]. Sensors, 2021, 21(17):5780.
- [17] BYUN S H, BAR-SEVER Y E. A new type of troposphere zenith path delay product of the international GNSS service[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83:1-7.

(编辑:孟彬)