



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 顾及对流层各向异性的实时 PPP 解算方法
作者: 赵庆志, 张登雄, 姚宜斌, 李祖锋, 吴侃, 高余婷, 王鹏程, 马智, 刘晨
DOI: 10.13203/j.whugis20240175
收稿日期: 2025-01-08
网络首发日期: 2025-01-24
引用格式: 赵庆志, 张登雄, 姚宜斌, 李祖锋, 吴侃, 高余婷, 王鹏程, 马智, 刘晨. 顾及对流层各向异性的实时 PPP 解算方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240175>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240175

引用格式：

赵庆志, 张登雄, 姚宜斌, 等. 顾及对流层各向异性的实时 PPP 解算方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, DOI:10.13203/J.whugis20240175 (ZHAO Qingzhi, ZHANG Dengxiong, YAO Yibin, et al. Real Time PPP Solution Method Considering Tropospheric Anisotropy[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, DOI:10.13203/J.whugis20240175)

顾及对流层各向异性的实时 PPP 解算方法

赵庆志¹, 张登雄¹, 姚宜斌², 李祖锋³, 吴侃⁴, 高余婷¹, 王鹏程¹, 马智¹, 刘晨⁵

1 西安科技大学测绘科学与技术学院, 陕西 西安, 710054

2 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉, 430079

3 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安, 710065

4 空军军医大学航空航天医学院教育部航空航天医学重点实验室, 陕西 西安, 710032

5 天津市轨道交通导航定位及时空大数据技术重点实验室, 天津, 300251

摘要：对流层各向异性是影响全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 定位精度的重要因素之一, 现有的实时精密单点定位 (Real Time-Precise Point Position, RT-PPP) 技术通常联合经验模型、投影函数和参数估计法消除对流层延迟影响, 但并未考虑对流层各向异性对定位结果的影响。太阳辐射是导致对流层各向异性的重要因素, 因此, 本文提出一种顾及太阳辐射导致对流层各向异性的 RT-PPP 解算方法, 该方法基于测站位置和地方时计算太阳高度角, 表征太阳辐射对 GNSS 信号的影响, 并对现有湿投影函数及随机模型改进, 构建顾及对流层各向异性的 RT-PPP 函数模型和随机模型。选取全球分布的 13 个国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 中心站年积日 64-70 共 7 天的多模式全球导航卫星系统 (Multimodal Global Navigation Satellite System, multi-GNSS) 观测数据对本文提出的方法进行验证, 实验结果表明, 本文提出的顾及

收稿日期: 2025-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42274039 和 42204034), 天津市轨道交通导航定位及时空大数据技术重点实验室开放课题基金 (TKL2024B03), 西安市科协青年人才托举项目 (959202313075) 及秦创原引用高层次人才创新创业人才项目 (QCYRCXM-2023-107) 联合资助支持。

第一作者: 赵庆志, 博士, 教授, 主要从事 GNSS 导航定位与空间环境监测相关研究。

zhaoqingzhia@163.com

对流层各向异性的 RT-PPP 定位方法优于传统方法, 在 N、E、U 三个方向上定位精度均有一定的改善。在收敛时间方面, 三个方向上收敛速度的改善率分别为 1.45%、0.93%和 2.67%。对不同纬度测站进行分析, 发现本文提出方法在不同纬度区间内测站的定位结果和收敛速度均有一定程度的改善, 说明本文提出方法具有一定的鲁棒性, 对进一步完善顾及对流层各向异性的 RT-PPP 理论与方法具有重要意义。

关键词: 实时精密单点定位;太阳辐射;高度角随机模型;映射函数

Real Time PPP Solution Method Considering Tropospheric Anisotropy

ZHAO Qingzhi ^{1*}, ZHANG Dengxiong ¹, YAO Yibin ², LI Zufeng ³, WU Kan ⁴,
GAO Yuting ¹, WANG Pengcheng ¹, MA Zhi ¹, LIU Chen ⁵

1 College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China

4 School of Aerospace Medicine, Key Laboratory of Aerospace Medicine of Ministry of Education, Air Force Medical University, Xi'an 710032, China

5 Tianjin Key Laboratory of Rail Transit Navigation Positioning and Spatiotemporal Big Data Technology, Tianjin 300251, China

Abstract: Objectives: Tropospheric anisotropy is one of the important factors affecting the positioning accuracy of Global Navigation Satellite Systems (GNSS). The existing Real Time Precision Point Position (RT-PPP) technology usually combines empirical models, projection functions, and parameter estimation methods to eliminate the influence of tropospheric delay, but does not consider the impact of tropospheric anisotropy on positioning results. Solar radiation is an important factor causing tropospheric anisotropy. Therefore, this paper proposes an RT-PPP calculation method that takes into account the tropospheric anisotropy caused by solar radiation. **Methods:** This article calculates the solar altitude angle based on the station position and local time, characterizes the influence of solar radiation on GNSS signals, and improves the existing wet projection function and stochastic model to construct RT-PPP function

model and stochastic model that consider the anisotropy of the troposphere. The method proposed in this paper is validated by selecting 7 days of multimodal global navigation satellite system (Multimodal Global Navigation Satellite System, Multi GNSS) observation data from 13 International GNSS Service (IGS) center stations distributed globally, with an annual area of 64-70 days. **Results:** The RT-PPP positioning method proposed in this article, which takes into account the anisotropy of the troposphere, outperforms traditional methods and improves positioning accuracy in the N, E, and U directions to some extent. In terms of convergence time, the improvement rates of convergence speed in the three directions are 1.45%, 0.93%, and 2.67%, respectively. Through analysis of stations at different latitudes, it was found that the method proposed in this paper has improved the positioning results and convergence speed of stations in different latitude intervals to a certain extent, indicating that the method proposed in this paper has a certain degree of robustness. **Conclusions:** The method proposed in this article considers the impact of solar radiation on satellite signals passing through the troposphere, filling the gap in the influence of tropospheric anisotropy on RT-PPP. It is of great significance for further improving the theory and methods of RT-PPP that take into account tropospheric anisotropy.

Keywords: Real time precision single point positioning; Solar radiation; Random model of height angle; Mapping function

实时精密单点定位 (Real Time-Precise Point Position, RT-PPP) 技术是进行高精度、高时效定位的重要手段。随着 2013 年 4 月国际全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 实时服务 (International GNSS Service Real Time Service, IGS-RTS) 产品的发布^[1], 用户可实时获取国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 中心及其分析中心的实时产品, 结合广播星历和改正文件恢复精密钟差及轨道文件, 获取时效性更高的高精度定位数据。RT-PPP 不受区域限制, 应用范围广, 已成为高精度导航定位领域的研究热点之一。误差处理是 RT-PPP 数据解算中的关键步骤^[2], 其中, 对流层延迟是直接影响其定位性能的重要因素之一。因此, 对对流层延迟更精确地表达有助于提高 RT-PPP

的定位精度和收敛速度^[3-4]。

对流层延迟是指卫星信号穿过对流层时发生折射或弯曲导致卫星信号产生的延迟。对流层延迟量级一般从几米到几十米不等^[5]，其对导航定位、卫星钟差确定及卫星定轨具有重要影响。因此，对流层延迟的精确表达是 RT-PPP 研究的重点和难点。在 RT-PPP 数据处理过程中，现有手段主要联合经验模型、参数估计和映射函数消除对流层延迟的影响^[6]。该方法主要思想是首先基于经验模型估计天顶静力学延迟（Zenith Hydrostatic Delay, ZHD）；其次，利用投影函数得到卫星信号路径上的干延迟分量，并基于天顶湿延迟（Zenith Wet Delay, ZWD）对该路径上的湿延迟分量进行表达；最后，利用参数估计方法得到 ZWD^[7]，将 ZHD 和 ZWD 相加得到准确的 ZTD 估值。映射函数是影响对流层延迟处理精度的重要的环节^[8]，同时也是建立大气天顶对流层延迟与斜路径延迟联系的关键。目前 RT-PPP 中常用的映射函数主要有全球映射函数（Global Mapping function, GMF）^[9]和 Vienna 系列映射函数（Vienna Mapping Function, VMF）^[10-11]，每种映射函数包括干映射函数和湿映射函数两部分。GMF 由于具有精度高、应用简单、输入参数少等优势广泛应用于 RT-PPP 中^[12]，因此本文使用 GMF 作为基础函数。VMF 系列映射函数精度高、结果稳定，但时效性不强，基于气象参数得到的系数仍有部分时延^[13-14]。叶克东分析了不同映射函数对 RT-PPP 定位解算的影响，结果表明不同映射函数对水平定位精度和收敛时间影响较小，但对 U 方向定位精度影响较大，且 VMF3 精度最优，GMF 和 VMF1 精度相当^[15]。尽管 GMF 和 VMF 已被广泛应用于 RT-PPP 中，但 RT-PPP 的函数模型并未顾及对流层各向异性对定位结果的影响。

此外，随机模型精确表达与否也会对观测值权值和数据处理精度产生一定影响^[16-18]。现有随机模型主要包括基于卫星高度角的随机模型^[19]，如 sin 型^[20]、sin-type 型^[21]、cos-type 型^[22]和指数型^[23]。相关学者在 RT-PPP 随机模型精化方面进行了大量研究，但现有研究尚未顾及对流层各向异性对 RT-PPP 随机模型的影响。太阳辐射是影响大气圈层的重要因素^[24-26]，会对穿过对流层的卫星信号产生重要影响^[27]，大气圈层的内部运动是一个复杂的过程，而对流层是大气活动的重要指标^[28]，因此本文通过太阳高度角反映太阳辐射体现对流层各向异性，但目前缺乏太阳辐射导致对流层各向异性的相关研究，且在顾及对流层各向异性的 RT-PPP

算法方面存在空白。

本文针对上述现状开展研究,提出一种顾及太阳辐射导致对流层各向异性的 RT-PPP 解算方法,该方法引入太阳高度角反映太阳辐射强度变化,并用于改进现有湿映射函数表达式和随机模型,构建顾及对流层各向异性的 RT-PPP 函数模型和随机模型。选取多模式全球导航卫星系统 (Multimodal Global Navigation Satellite System, multi-GNSS) 测站对本文提出的方法进行验证,发现本文提出方法在保证测站坐标精度的前提下能够有效改善 RT-PPP 的收敛速度,对快速获取高精度实时定位结果具有重要意义。

1 RT-PPP 解算理论与方法

1.1 卫星轨道和钟差恢复

基于状态空间域增强服务 (State Space Representation, SSR) 轨道改正数据校正广播星历恢复精密卫星轨道时,需要选择与广播星历具有相同数据期龄 (Issue Of Data, IOD) 的轨道参数。在进行精密轨道合成时,全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 与伽利略卫星导航系统 (Galileo satellite navigation system, Galileo) 的广播星历提供了 IOD 参数,但北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 没有提供 IOD 参数,其计算公式如下:

$$IOD_{BDS} = (\text{int}(TOE_{\text{sec}}) / 720) \bmod 240 \quad (1)$$

式中, IOD_{BDS} 为 BDS 的 IOD 参数, TOE_{sec} 为广播星历内的周内秒。

假设在 t 时刻卫星在径向、切向、法向的轨道和轨道速率校正值为 δ_t^r 、 δ_t^a 、 δ_t^c 、 $\dot{\delta}_t^r$ 、 $\dot{\delta}_t^a$ 、 $\dot{\delta}_t^c$, 对于 t 后邻近时刻 t_0 , 轨道校正量 ΔC 为:

$$\Delta C = \begin{bmatrix} \delta_{t_0}^r \\ \delta_{t_0}^a \\ \delta_{t_0}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_t^r \\ \delta_t^a \\ \delta_t^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\delta}_t^r \\ \dot{\delta}_t^a \\ \dot{\delta}_t^c \end{bmatrix} (t_0 - t) \quad (2)$$

将轨道校正值转换到 ECEF 坐标系下:

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \\ a \\ c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{t_0}^r \\ \delta_{t_0}^a \\ \delta_{t_0}^c \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中， \bar{a} 为切向单位矢量， $\bar{a} = \frac{\bar{v}}{|\bar{v}|}$ ， \bar{v} 为卫星速度矢量， \bar{c} 为法向单位矢量， $\bar{c} = \frac{\bar{r} \times \bar{v}}{|\bar{r} \times \bar{v}|}$ ， \bar{r} 为径向单位矢量， $\bar{r} = \bar{a} \times \bar{c}$ 。

则 t_0 时刻通过实时校正值得改正后的卫星精密轨道位置 S_p 为：

$$S_p = \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.2 RT-PPP 观测方程构建

RT-PPP 数据处理的过程中，建立正确的函数模型是进行数据解算的关键^[29]，观测方程通常采用空间后方交会确定地面测站的位置。GNSS 接收机接收到的信号主要包括载波相位观测值 $l_{r,i}^s$ 与测码伪距观测值 $p_{r,i}^s$ ，某一历元由载波相位观测值和测码伪距观测值组成的基本观测方程如下所示：

$$\begin{cases} p_{r,i}^s = \rho_{r,i}^s + v_{r,i} - v_i^s + Ion_{r,i}^s + Trop_{r,i}^s + k_{r,i} + k_i^s + \mu_{r,i}^s \\ l_{r,i}^s = \rho_{r,i}^s + v_{r,i} - v_i^s - Ion_{r,i}^s + Trop_{r,i}^s + K_{r,i} + K_i^s + \lambda_i N_{r,i}^s + \varepsilon_{r,i}^s \end{cases} \quad (5)$$

式中， $\rho_{r,i}^s$ 表示站星几何距离， i 表示信号频率标志， r 和 s 分别代表接收机和卫星系统， $p_{r,i}^s$ 表示测码伪距观测值， $l_{r,i}^s$ 表示载波观测值， $v_{r,i}$ 和 v_i^s 分别表示接收机端和卫星端钟差， $k_{r,i}$ 和 $K_{r,i}$ 分别表示接收机端伪距延迟以及载波相位硬件延迟； k_i^s 和 K_i^s 分别表示卫星端伪距延迟以及载波相位硬件延迟； $Ion_{r,i}^s$ 和 $Trop_{r,i}^s$ 分别表示电离层延迟和对流层延迟； λ_i 为载波信号频率的波长， $N_{r,i}^s$ 表示整周模糊度； $\mu_{r,i}^s$ 和 $\varepsilon_{r,i}^s$ 分别表示伪距的残差项载波相位的残差项，对流层误差可表示为如下形式：

$$Trop_{r,i}^s = M_h(\varepsilon) \times ZHD + M_w(\varepsilon) \times ZWD + M_g(\varepsilon) \cdot [G_{ns} \cos \varphi + G_{ew} \sin \varphi] + \gamma_i \quad (6)$$

式中， ε 为卫星高度角， φ 为测站到卫星的方位角， $M_h(\varepsilon)$ 为干映射函数， $M_w(\varepsilon)$ 为湿映射函数， $M_g(\varepsilon)$ 为水平梯度映射函数， G_{ns} 和 G_{ew} 分别表示水平梯度改正的南北方向分量与东西方向分量， γ_i 表示对流层延迟残差。

1.3 RT-PPP 函数模型构建

RT-PPP 数据处理的过程中，广泛使用的函数模型有主要有无电离层组合模型和 Uofc 模型，该类模型能够消除一阶电离层误差和待估参数，模型简单。根据式（6）可以得到双频无电离层组合模型为：

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{r,IF}^s = a_2 P_1 - a_1 P_2 \\ \quad = e_r^s \cdot x + v_{r,IF} - v_{IF}^s + ZWD \cdot M_w(\varepsilon) + \mu_{r,IF}^s \\ L_{r,IF}^s = a_2 L_1 - a_1 L_2 \\ \quad = e_r^s \cdot x + v_{r,IF} - v_{IF}^s + ZWD \cdot M_w(\varepsilon) + \lambda_{IF}^s N_{r,IF}^s + \varepsilon_{r,IF}^s \\ \alpha_1 = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}, \alpha_2 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \end{array} \right. \quad (7)$$

式中， $P_{r,IF}^s$ 为双频无电离层组合伪距观测值， $L_{r,IF}^s$ 为双频无电离层组合载波相位观测值， e_r^s 为接收机到卫星的单位向量， x 为接收机在 X、Y、Z 方向的近似坐标， f_1 和 f_2 分别表示不同的频率。

将式（7）进行线性化之后，可以得到某个历元的线性方程为：

$$\left\{ \begin{array}{l} L_p = AX + ZWD \cdot M_w(\varepsilon) + v_p \\ L_l = AX + ZWD \cdot M_w(\varepsilon) + eY + v_l \\ Z = (\bar{A}^T W \bar{A})^{-1} \bar{A}^T W L \\ v = L - \bar{A} Z \end{array} \right. \quad (8)$$

式中， L_p 和 L_l 表示伪距和相位观测值与计算值差值（Observed Minus Computed, OMC）矢量， $A = \begin{bmatrix} A' & e \\ A_{ZWD} & 0 \end{bmatrix}$ 表示设计矩阵，其中包含 ZWD 参数的系数， X 表示待估参数， Y 表示模糊度， e 为单位矩阵， v_p 和 v_l 表示伪距和相位观测值的残差， W 表示观测值的权重矩阵， $\bar{A} = \begin{bmatrix} A & e \\ A & 0 \end{bmatrix}$ ， $L = \begin{bmatrix} L_p \\ L_l \end{bmatrix}$ ， $Z = \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$ 。

1.4 RT-PPP 随机模型构建

随机模型会影响数据解算和参数估计的精度，常用的随机模型有：sine 型^[20]、sine-type 型^[21]、cos-type 型^[22]以及指数型^[23]，公式如下所示：

$$\begin{cases} \text{sine} & : \sigma = \sigma_0 / \sin \varepsilon \\ \text{sine-type} & : \sigma = \sigma_0 \sqrt{\alpha_1 + \beta_1} / \sin \varepsilon \\ \text{cos-type} & : \sigma = \sigma_0 \sqrt{\alpha_3 + \beta_3 \cos^n \varepsilon} \\ \text{exponential} & : \sigma = \sigma_0 (\alpha_2 + \beta_2 \exp(-\varepsilon / \varepsilon_0)) \end{cases} \quad (9)$$

式中， ε 表示卫星高度角， $\alpha_1=0.64$ ， $\beta_1=0.36$ ， $\alpha_2=1$ ， $\beta_2=3.5$ ， $\alpha_3=1$ ， $\beta_3=4$ ， $n=8$ ， $\varepsilon_0=90^\circ$ 。

2 顾及对流层各向异性的 RT-PPP 解算方法

2.1 太阳辐射导致对流层各向异性的 RT-PPP 解算方法

现有研究仅顾及卫星高度角变化，采用投影函数将天顶方向对流层延迟恢复到卫星信号方向上，并未顾及对流层各向异性对卫星信号的影响。太阳辐射是影响对流层各向异性的重要因素，因此，本文提出一种太阳辐射导致对流层各向异性的 RT-PPP 解算方法，对 RT-PPP 函数模型和随机模型进行改进。该方法主要思想：首先，恢复精密轨道及钟差信息，并基于测站经度、纬度、地方时计算太阳高度角，表征太阳辐射强度；其次，利用太阳高度角构建顾及对流层各向异性的 RT-PPP 函数模型和随机模型；最后，对构建的函数模型进行解算，并对其精度进行评估。本文提出方法整体流程如图 1 所示，具体步骤如下：

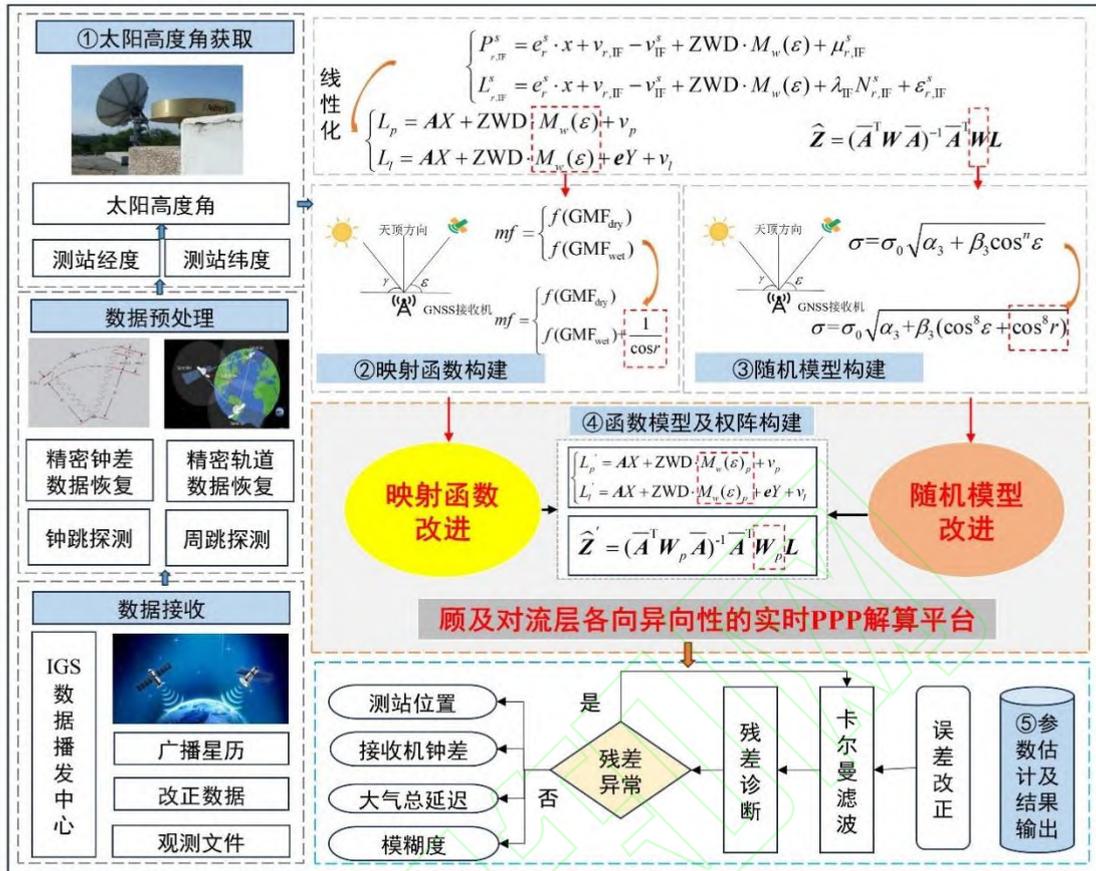


图 1 顾及对流层各向异性的 RT-PPP 解算整体流程

Fig.1 Overall process of RT-PPP solution considering tropospheric anisotropy

(1) 太阳高度角计算

由于无法获取全球不同测站实测太阳辐射数据，本文利用太阳高度角间接表示太阳辐射强度^[30]。太阳高度角是指太阳直射光线与地平面的夹角，可利用测站经纬度、地方时计算，其计算公式如下：

$$\begin{cases} N_0 = 79.6764 + 0.2422(Y - 1985) - \text{int}[0.25(Y - 1985)] \\ Q = 2\pi \times 57.3 \times \frac{\text{doy} + \Delta N - N_0}{365.2422} \\ E_Q = 0.0028 - 1.9857 \sin Q + 9.9059 \sin 2Q \\ \quad - 7.90924 \cos Q - 0.6882 \cos 2Q \end{cases} \quad (10)$$

式中，doy 为年积日， ΔN 为年积日订正值，由观测点与格林尼治经度差产生的时间差订正值 L 与观测时刻和格林尼治 0 时时间差订正值 R 两项组成，如下所示：

$$\begin{cases} L = \frac{1}{15}(D + \frac{M}{60}) \\ R = S + \frac{F}{60} \\ \Delta N = \frac{1}{24}(R + L) \\ TT = T_M + E_Q = C_T + L_C + E_Q \end{cases} \quad (11)$$

式中， D 为观测点的经度， M 为分值，可换算成与格林尼治时间差 L ， S 为观测时刻的时值， F 为观测时刻的分值， TT 为真太阳时， T_M 为地方时， C_T 为时区时， L_C 为经度订正， E_Q 为时差。

$$\begin{cases} D_E = 0.3723 + 23.2567\sin Q + 0.1149\sin 2Q - 0.1712\sin 3Q - \\ \quad 0.758\cos Q + 0.3656\cos 2Q + 0.0201\cos 3Q \\ T_0 = (TT - 12) \times 15 \\ r = \arcsin(\sin \varphi \times \sin D_E + \cos \varphi \times \cos D_E \times \cos T_0) \end{cases} \quad (12)$$

式中， D_E 为太阳赤纬， r 为太阳高度角， φ 为当地纬度， T_0 为太阳时角。

(2) 顾及对流层各向异性的观测方程构建

由于太阳辐射会对大气中水汽分布造成影响，因此对现有 GMF 湿映射函数进行改进，下面给出基于 GMF 湿映射函数改进的映射函数的具体公式：

$$mf_{\text{wet}} = f(\text{GMF}_{\text{wet}}) + \frac{1}{\cos r} \quad (13)$$

由于 r 太大或太小会导致湿映射函数中该部分权比影响过大，因此，过度纠正对流层各项异性会对解算结果造成负面影响，因此，本文选取的 r 范围为30-60度。将公式(15)代入公式(7)，得到顾及对流层各向异性的观测方程。

(3) 顾及对流层各向异性的随机模型构建

cos-type 型随机模型较传统随机模型有更好的鲁棒性和精度 (Hadas et al., 2020)，因此，本文选用 cos-type 型随机模型为基础模型。太阳辐射导致大气水汽各向异性变化会对随机模型造成影响，因此，仿照随机模型中卫星高度角的函数表达，给出顾及太阳高度角的随机模型表达，其具体公式如下：

$$\sigma = \sigma_0 \sqrt{\alpha_3 + \beta_3 (\cos^8 \varepsilon + \cos^8 r)} \quad (14)$$

式中， r 为太阳高度角。

(4) 函数模型及权阵构建

$$\begin{cases} P_{r,IF}^{s'} = e_r^s \cdot x + v_{r,IF} - v_{IF}^s + ZWD \cdot M_w(\varepsilon)_p + \mu_{r,IF}^s \\ L_{r,IF}^s = e_r^s \cdot x + v_{r,IF} - v_{IF}^s + ZWD \cdot M_w(\varepsilon)_p + \lambda_{IF} N_{r,IF}^s + \varepsilon_{r,IF}^s \end{cases} \quad (15)$$

式中, $P_{r,IF}^{s'}$ 和 $L_{r,IF}^s$ 为改进的双频无电离层组合伪距观测值和载波相位观测值,

$M_w(\varepsilon)_p$ 为顾及对流层各向异性的对流层湿映射函数, 将上式进行线性化:

$$\begin{cases} L_p' = AX + ZWD \cdot M_w(\varepsilon)_p + v_p \\ L_l' = AX + ZWD \cdot M_w(\varepsilon)_p + eY + v_l \\ Z' = (\bar{A}^T W_p \bar{A})^{-1} \bar{A}^T W_p L \\ v = L - \bar{A}Z' \end{cases} \quad (16)$$

式中, L_p' 和 L_l' 为改进的伪距和相位观测值与计算值的差值, W_p 为改进的观测值权阵。

(5) 参数估计与精度评估

本文利用卡尔曼滤波进行参数估计, 并以 IGS 数据中心发布的周解坐标文件作为真值, 采用均方根 (RMS) 和偏差 (Bias) 的绝对值进行测站坐标结果的评估。

2.2 RT-PPP 解算策略

本文利用 multi-GNSS 数据基于 RT-PPP 技术, 设计两种方案对本文提出的顾及对流层各向异性的 RT-PPP 解算方法进行验证, 其中方案一为传统 GMF 映射函数和 cos-type 型随机模型解算方法, 方案二为本文提出的顾及对流层各向异性的 RT-PPP 方法, 分别对单系统和多系统进行解算, 并以 IGS 数据中心发布的周解坐标文件作为真值, 对实验结果进行评估, RT-PPP 解算策略如下所示:

表 1 RT-PPP 解算具体策略

Tab.1 Specific strategies for RT-PPP solution

项目	处理策略
函数模型	无电离层组合模型
采样间隔	30s
截止高度角	10°
接收机天线相位偏差	igs14.atx

SSR 数据挂载点	SSRA00CNE0
卫星轨道 / 钟差	广播星历+SSR 数据
天线相位缠绕等	模型改正 ^[31-33]
周跳探测	MW 组合+GF 组合 ^[34-35]
对流层干延迟	GPT2w 模型 ^[36]
对流层湿延迟	随机游走
观测值随机模型	cos-type 型随机模型 ^[22] / 改进的随机模型（本文方法）
映射函数	GMF ^[9] / 改进的映射函数（本文方法）
系统间偏差	随机游走
参数估计	卡尔曼滤波

3. 结果与分析

试验数据包括全球分布的 13 个 IGS 测站实时观测数据，广播星历，改正数据，数据时间跨度为 2023 年年积日 64-70 共 7 天的数据。图 2 给出了选取的 13 个 IGS 站点分布。

3.1 测站信息

为了准确评价本文方法对测站定位精度和收敛速度的影响，本文选取全球分布的 13 个 IGS 测站，广播星历选择 RTCM3EPH-MGEX，改正数据选择 SSRA00CNE0，测站分布如图 2 所示：

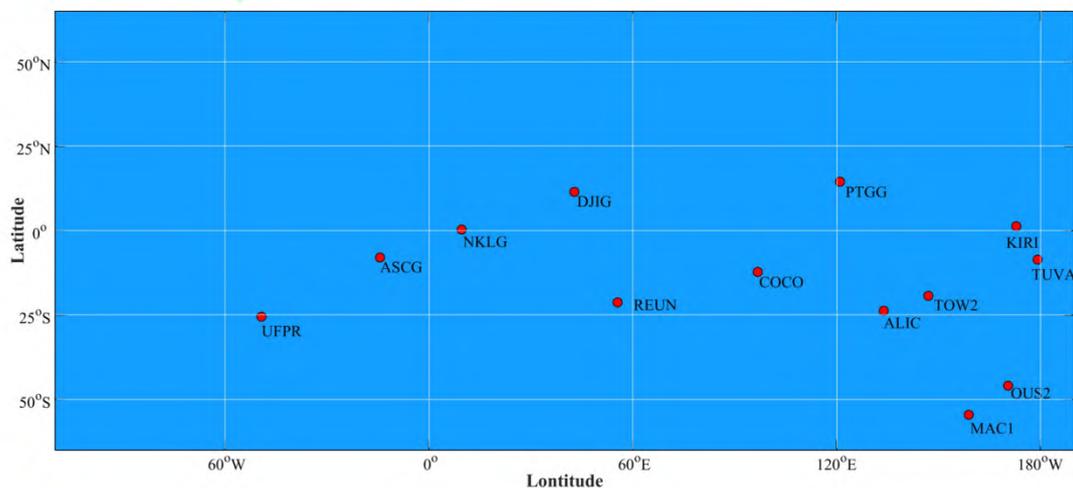


图 2 试验选取 IGS 测站分布

Fig.2 Distribution of IGS stations selected in the experiment

3.2 RT-PPP 定位性能分析

(1) 个别测站定位性能分析

为了分析本文提出方法在特定站点上的定位精度，选取四个测站（TUVA、PTGG、NKLK 和 MAC1）采用不同方案进行解算，并以 IGS 数据中心发布的周解坐标文件作为坐标真值，分析其定位精度。由于低纬度测站在赤道附近受太阳辐射影响较大，最终选取两个低纬度站点 NKLK、TUVA 测站，一个中纬度站点 PTGG 测站和一个高纬度站点 MAC1 测站对比不同方案测站定位精度。图 3 给出了 2023 年年积日 64-70 天四个测站不同方案 N、E、U 方向均方根误差(RMS) 及偏差绝对值 (ABias) 对比图，由图 3 可以看出，方案二测站的定位精度在 N、E、U 三个方向更高，进一步证实太阳辐射导致的对流层各向异性对随机模型和函数模型改进的必要性。此外，表 2 给出了 2023 年年积日 64-70 天四个测站不同方案 N、E、U 方向 RMS 及其改善率。由表 2 可知，选取的测站在 N、E、U 三个方向上的定位精度均有所提高，且在 U 方向改善最多，其他方向次之。在 MAC1 测站定位精度改善率最高，定位精度在 N、E、U 三个方向分别可以提高 0.24 cm、0.35 cm 和 1.81 cm，改善率分别可以达到 3.39%、7.11%和 11.71%。表 3 给出了 2023 年年积日 64-70 天四个测站不同方案 N、E、U 方向偏差绝对值 (ABias)，由表 3 可知，方案二测站的 ABias 在 N、E、U 三个方向有所降低，其中 MAC1 测站相较于方案一测站的 ABias 在 N、E、U 三个方向上分别降低了 0.35 cm、4.53 cm 和 3.96 cm，进一步证实本文方法对测站的定位精度具有较好的改善效果。

表 2 2023 年年积日 64-70 天四个测站不同方案 N、E、U 方向 RMS 及其改善率

Tab.2 RMS and their improvement rates in N, E, and U directions for four stations with annual accumulation days 64-70 days in 2023

RMS/(cm)	TUVA	PTGG	NKLK	MAC1
N(方案一)	6.44	7.71	8.25	7.10
N(方案二)	6.27	7.84	8.07	6.86

E(方案一)	8.43	10.36	8.92	5.01
E(方案二)	8.15	10.21	8.76	4.66
U(方案一)	14.27	16.95	15.59	15.80
U(方案二)	13.87	16.79	15.05	13.95
改善率/(%)	TUVA	PTGG	NKLG	MAC1
N	2.58	-1.66	2.14	3.39
E	3.35	1.36	1.76	7.11
U	2.81	0.96	3.46	11.71

表 3 2023 年年积日 64-70 天四个测站不同方案 N、E、U 方向偏差绝对值
(ABias)

Tab. 3 Absolute deviation values (ABias) in the N, E, and U directions for four different measurement stations with a total of 64-70 days per year in 2023 under different schemes

ABias/(cm)	PTGG	MAC1	NKLG	TUVA
N(方案一)	15.02	6.63	4.12	2.55
N(方案二)	14.59	6.28	4.15	2.55
E(方案一)	14.36	16.32	4.01	4.15
E(方案二)	14.39	11.79	3.72	4.02
U(方案一)	3.98	5.07	7.62	0.45
U(方案二)	3.93	1.11	7.87	0.15

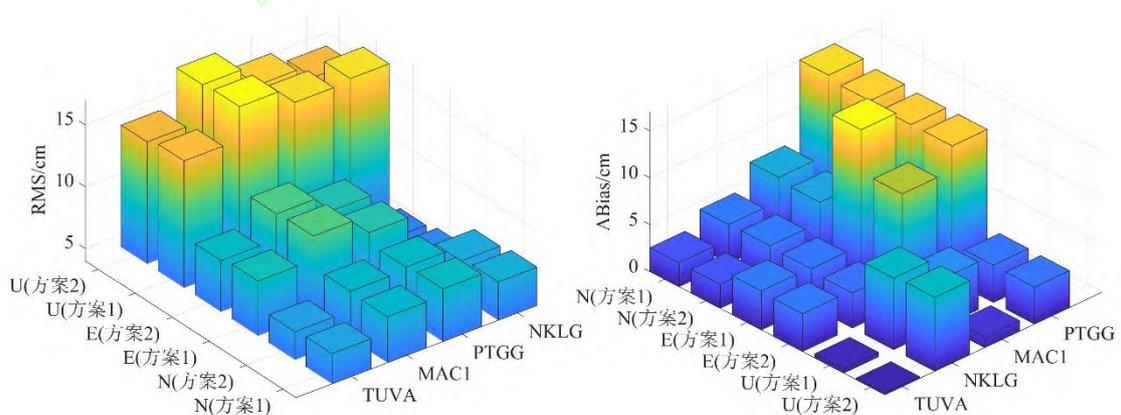


图 3 2023 年年积日 64-70 天四个测站不同方案 N、E、U 方向均方根误差

(RMS) 及偏差绝对值 (ABias) 对比图

Fig. 3 Comparison of Root Mean Square Error (RMS) and Absolute Deviation (ABias) in the N, E, and U directions for four different measurement stations with annual accumulation days of 64-70 days in 2023

(2) 单系统、多系统定位性能分析

为了进一步验证本文提出方法的有效性,采用不同方案对比不同系统组合的定位结果。图 4 给出了 2023 年年积日 64-70 天不同系统组合、不同方案 N、E、U 方向所有测站 RMS。由图 4 可知,不同卫星系统组合均对定位结果产生不同的影响,定位结果在 E 和 U 方向上均有不同程度的改善,且不同卫星系统组合的定位结果均保持在 U 方向改善率最好,其他方向次之,证实本文方法能有效提升不同系统组合测站定位精度。此外,表 4 给出了 2023 年年积日 64-70 天不同系统组合、不同方案 N、E、U 方向所有测站 RMS 及其改善率。由表 4 可以看出,GEC 系统组合在 N、E、U 三个方向上方案二的 RMS 分别能够保持在 5.46 cm、7.32 cm 和 13.78 cm,GEC 系统组合的定位精度改善率最好,在 U 方向上定位精度改善率达到 1.94%,其中三系统解算方案和双系统解算方案定位结果相当,且定位精度改善率较单系统解算方案较优。不同系统的平均 RMS 在 N、E、U 三个方向上分别改善了 0.30%、1.16%和 1.52%,进一步证明本文方法在定位结果方面有一定的改善。

表 4 2023 年年积日 64-70 天不同系统组合、不同方案 N、E、U 方向所有测站 RMS 及其改善率

Tab.4 RMS and improvement rate of all measurement stations in the N, E, and U directions for different system combinations and schemes, with an annual product of 64-70 days in 2023

定位误差/(cm)	GEC	GE	GC	G	TOTAL
RMSN(方案一)	5.47	5.53	5.25	6.81	5.77
RMSN(方案二)	5.46	5.53	5.27	6.73	5.75
RMSE(方案一)	7.42	7.70	6.95	7.33	7.35
RMSE(方案二)	7.32	7.61	6.91	7.23	7.27
RMSU(方案一)	14.05	14.23	13.05	15.49	14.21

RMSU(方案二)	13.78	13.98	12.99	15.21	13.99
改善率/(%)	GEC	GE	GC	G	TOTAL
N	0.13	0.00	-0.34	1.18	0.30
E	1.42	1.22	0.57	1.40	1.16
U	1.94	1.76	0.46	1.80	1.52

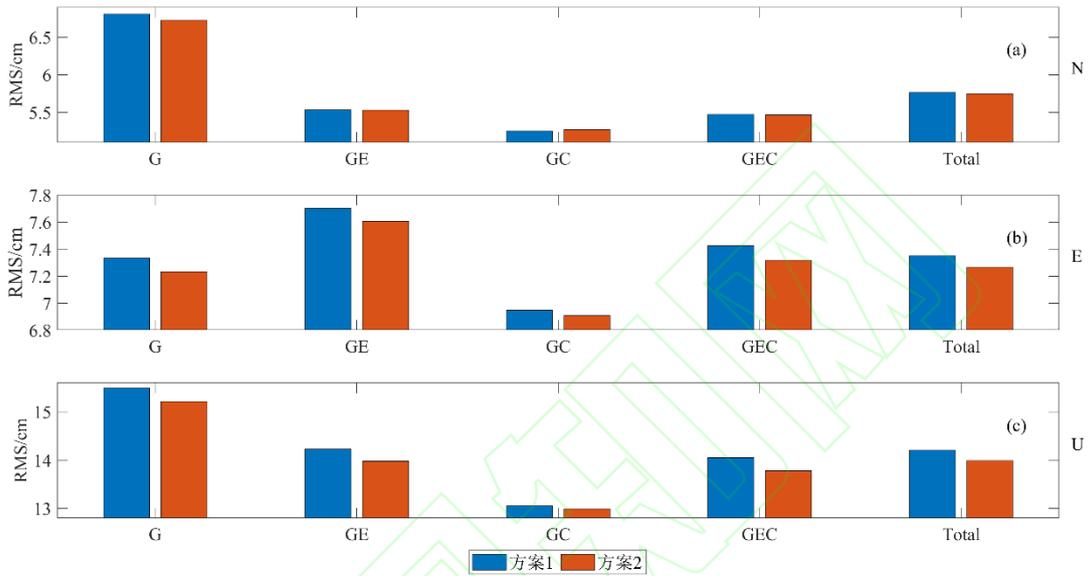


图 4 2023 年年积日 64-70 天不同系统组合、不同方案 N、E、U 方向所有测站 RMS

Fig.4 RMS of all measurement stations in the N, E, and U directions for different system combinations and schemes with an annual product of 64-70 days in 2023

3.3 RT-PPP 收敛时间分析

(1) 个别测站 PPP 收敛时间分析

为了验证本文提出方法在收敛时间上的改善效果,对上述四个站点的收敛时间进行分析。本文将在 N 和 E 方向连续 10 min 定位误差小于 0.2 m 且在 U 方向连续 10 min 定位误差小于 0.4 m 的第一个观测历元认定为收敛时间^[37]。图 5 给出了 2023 年年积日 64-70 天四个测站不同方案的 N、E、U 三个方向收敛时间。由图 5 可以看出,方案二测站收敛时间在 N、E、U 三个方向上有显著的降低,证实本文方法对四个测站收敛时间具有一定的改善。此外,表 5 给出了 2023 年年积日 64-70 天四个测站、不同方案 N、E、U 方向的收敛时间。由表 5 可知,选取的测站在 N、E、U 三个方向上的收敛时间均有所降低,且 U 方向上改善最

多，其他方向次之。在 NKLG 测站整体收敛时间改善最多，N、E、U 方向的收敛时间分别可以提高 0.08 min、0.32 min 和 3.80 min，改善率分别可以达到 0.53%、2.62%和 23.84%，进一步证实本文方法具有加快收敛时间的效果。

表 5 2023 年年积日 64-70 天四个测站不同方案 N、E、U 方向收敛时间
Tab.5 Convergence time in N, E, and U directions for different schemes of four measurement stations with an annual average of 64-70 days in 2023

收敛时间/(min)	MAC1	NKLG	TUVA	PTGG
N(方案一)	10.87	16.99	9.23	12.27
N(方案二)	9.59	16.90	9.10	12.21
E(方案一)	13.61	12.04	8.99	16.07
E(方案二)	13.94	11.72	8.95	15.26
U(方案一)	18.94	15.93	17.65	17.88
U(方案二)	16.76	12.13	17.48	16.83
改善率/(%)	MAC1	NKLG	TUVA	PTGG
N	11.73	0.53	1.47	0.49
E	-2.44	2.62	0.40	5.04
U	11.48	23.84	0.97	5.83

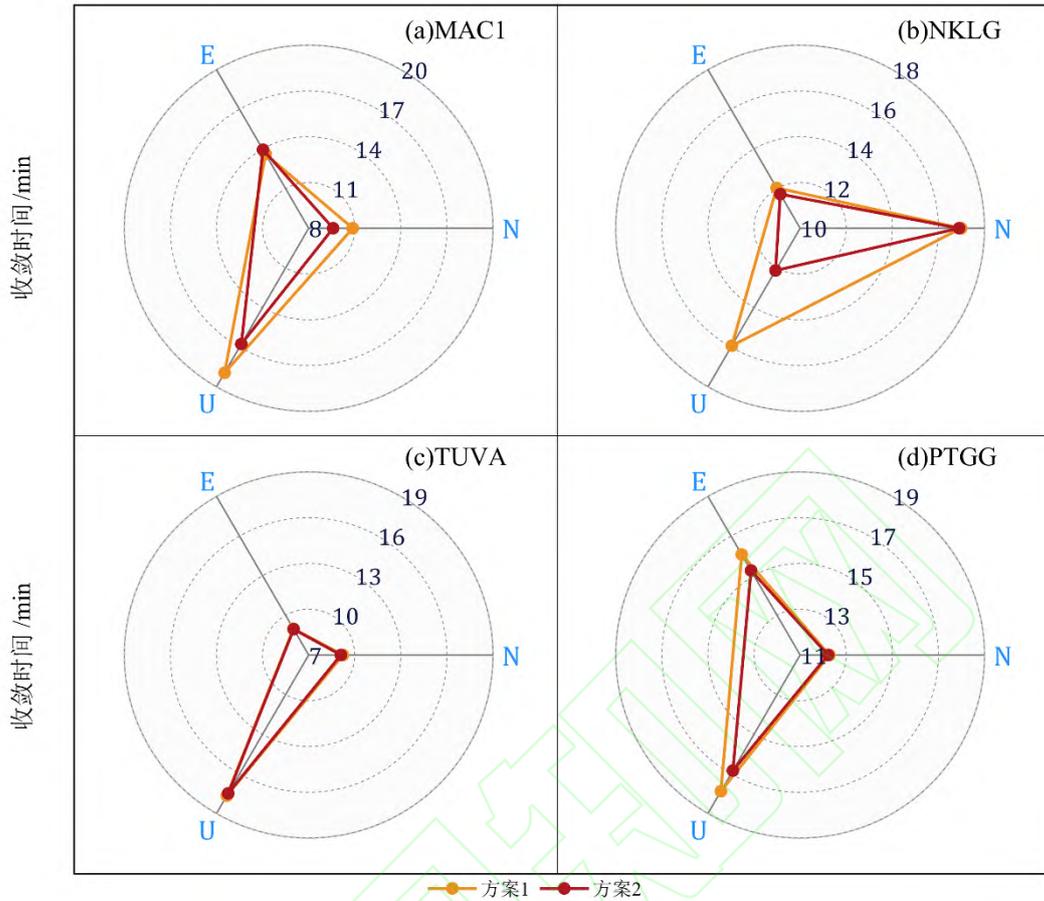


图 5 2023 年年积日 64-70 天四个测站不同方案 N、E、U 方向收敛时间
 Fig.5 Convergence time in N, E, and U directions for different schemes of four measurement stations with an annual accumulated day of 64-70 days in 2023

(2) 单系统、多系统收敛时间分析

为了准确评价本文方法对收敛时间的影响,选取不同系统组合、不同方案站点的整体收敛时间进行分析。图 6 给出了 2023 年年积日 64-70 天不同系统组合、不同方案 N、E、U 方向所有测站的收敛时间,由图 6 可知,GEC 组合与 GE 组合的收敛时间相当,GC 组合质量稍差,单 GPS 系统的收敛时间有较大的改善,证实本文算法对整体收敛时间提升的必要性。此外,表 6 给出了 2023 年年积日 64-70 天不同系统组合、不同方案 N、E、U 方向所有测站的收敛时间。由表 6 可以看出,方案二测站的整体收敛时间在 N、E、U 三个方向上可以达到 14.78 min、13.93 min 和 16.69 min,在三个方向上的改善率可以达到 1.45%、0.93%和 2.67%。GEC 组合、GE 组合、单 GPS 均在 U 方向上有较大的改善率,其他方向次之,单 GPS 在 U 方向上改善率达到 3.85%,而 GEC 组合和 GE 组合在 U 方向改善率

分别可以达到 3.76%、3.55%，进一步证明本文方法对 RT-PPP 收敛时间具有较大的改善。

表 6 2023 年年积日 64-70 天不同系统组合、不同方案 N、E、U 方向所有测站整体收敛时间

Tab.6 Overall convergence time of all measurement stations in the N, E, and U directions for different system combinations and schemes, with an annual product of 64-70 days in 2023

收敛时间/(min)	GEC	GE	GC	G	Total
N(方案一)	11.98	11.7	13.77	22.53	15.00
N(方案二)	11.80	11.53	13.61	22.18	14.78
E(方案一)	11.28	11.22	12.57	21.15	14.06
E(方案二)	11.21	11.13	12.68	20.68	13.93
U(方案一)	13.95	14.03	14.85	25.75	17.15
U(方案二)	13.43	13.53	15.04	24.76	16.69

改善率/(%)	GEC	GE	GC	G	Total
N	1.54	1.52	1.16	1.54	1.45
E	0.6	0.73	-0.85	2.26	0.93
U	3.76	3.55	-1.25	3.85	2.67

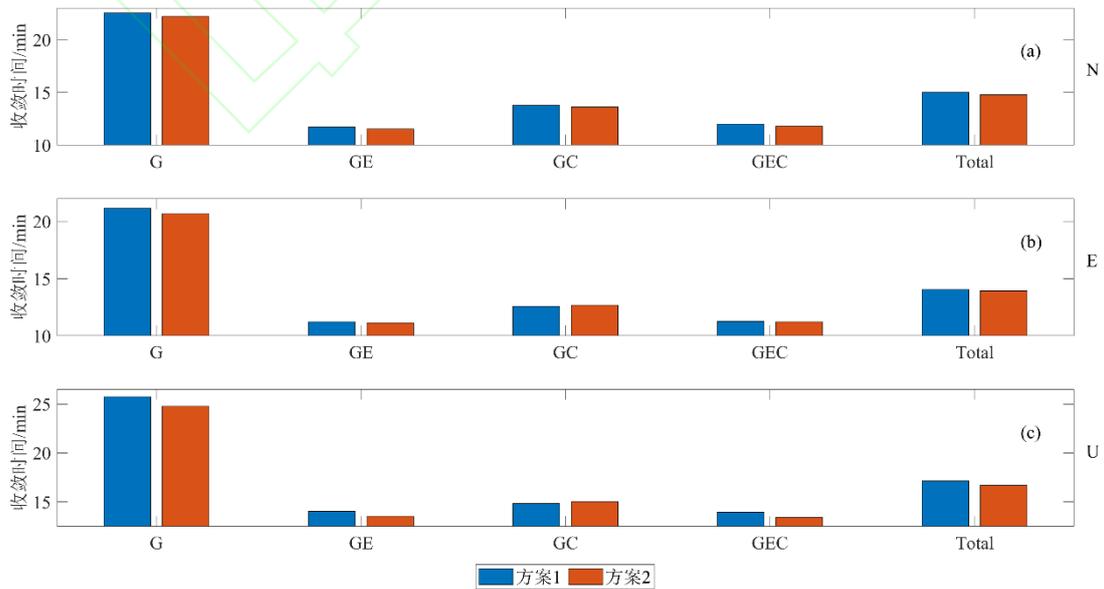


图 6 2023 年年积日 64-70 天不同系统组合、不同方案 N、E、U 方向所有测站整体收敛时间

Fig.6 Overall convergence time of all measurement stations in the N, E, and U directions for different system combinations and schemes, with an annual product of 64-70 days in 2023

3.4 不同纬度上定位性能和收敛时间分析

由于太阳辐射与纬度相关, 为了进一步验证本文提出方法在不同纬度上的鲁棒性, 根据选取测站位置情况将测站分为低纬度、中纬度以及高纬度三类(表 7), 并对不同纬度、不同方案的定位误差和收敛时间进行对比。

表 7 实验中根据不同纬度区间对测站分类列表

Tab.7 Classification list of measurement stations based on different latitude intervals in the experiment

低纬度 (10°S-10°N)		中纬度 (10°N-20°N, 10°S-20°S)		高纬度 (>20°N,>20°S)	
NKLG	TUVA	DJIG	TOW2	REUN	UFPR
KIRI		COCO		ALIC	MAC1
ASCG		PTGG		OUS2	

图 7 给出了 2023 年年积日 64-70 天不同纬度、不同方案及不同系统组合 N、E、U 方向所有测站的定位误差。由图 7 可知, 本文方法在不同系统组合有部分改善。在低纬度和高纬度测站, 均保持 GEC 系统组合定位精度改善最优, 最优定位精度改善为低纬度 GEC 系统组合, 在 N、E、U 三个方向改善率分别为 2.05%、1.05%和 2.63%, 但在中纬度测站保持单 GPS 系统定位精度改善最优, 在 N、E、U 三个方向改善率分别为 0.48%、1.54%和 1.51%。图 8 给出了 2023 年年积日 64-70 天不同纬度、不同方案及不同系统 N、E、U 方向所有测站组合的收敛时间, 由图 8 可知, 本文方法在不同纬度、不同系统组合测站的收敛时间有部分改善。在低纬度测站, GE 系统组合和单 GPS 系统收敛时间改善较优, 在 N、E、U 方向改善率分别可以达到 0.18%、0.99%、7.29%和 2.11%、3.08%、5.21%; 在中纬度和高纬度测站单 GPS 系统改善较优, 在 N、E、U 三个方向分别可以达到 0.13%、

3.00%和 3.6219%和 2.61%、0.05%和 2.72%，证实本文提出的顾及对流层各向异性的 RT-PPP 算法对不同纬度的收敛时间和定位精度均有提高。表 8 给出了 2023 年年积日 64-70 天不同纬度、不同方案 N、E、U 方向所有测站定位误差和收敛时间及其改善率统计，由表 8 可知，方案二的定位误差在高纬度测站最小，在 N、E、U 三个方向分别可以达到 5.00 cm、6.37 cm 和 12.99 cm。定位精度的改善率在低纬度测站的 N 方向和 E 方向改善较多，分别可以达到 1.75%、1.32%；在高纬度测站，U 方向改善率可达到 2.27%。收敛时间在低纬度测站改善最优，N、E、U 三个方向改善率分别可以达到 0.71%、1.30%和 4.55%；中纬度和高纬度测站分别在 N 和 E 方向改善最优，改善率分别可以达到 2.04%、2.23%，进一步说明本文提出的顾及对流层各向异性的 RT-PPP 解算方法受纬度影响较小，具有较强的普适性，对不同纬度测站的定位精度和收敛时间均有所精化。

表 8 2023 年年积日 64-70 天不同纬度、不同方案 N、E、U 方向所有测站定位误差和收敛时间及其改善率

Tab.8 Positioning errors, convergence times, and improvement rates of all stations in the N, E, and U directions for different latitudes and schemes, with an annual product of 64-70 days in 2023

方向	定位误差 (RMS/cm)			收敛时间 (min)		
	低纬度	中纬度	高纬度	低纬度	中纬度	高纬度
N(方案一)	6.68	5.77	5.03	18.88	15.01	11.88
N(方案二)	6.57	5.87	5.00	18.75	14.74	11.64
E(方案一)	8.51	7.34	6.43	15.37	16.51	11.04
E(方案二)	8.40	7.25	6.37	15.17	16.14	11.15
U(方案一)	15.45	14.11	13.29	18.85	18.27	14.88
U(方案二)	15.20	14.04	12.99	17.99	18.01	14.59
改善率/(%)	Total	Total	Total	Total	Total	Total
N	1.75	-1.67	0.57	0.71	1.79	2.04
E	1.32	1.25	0.92	1.30	2.23	-1.05
U	1.63	0.52	2.27	4.55	1.47	1.94

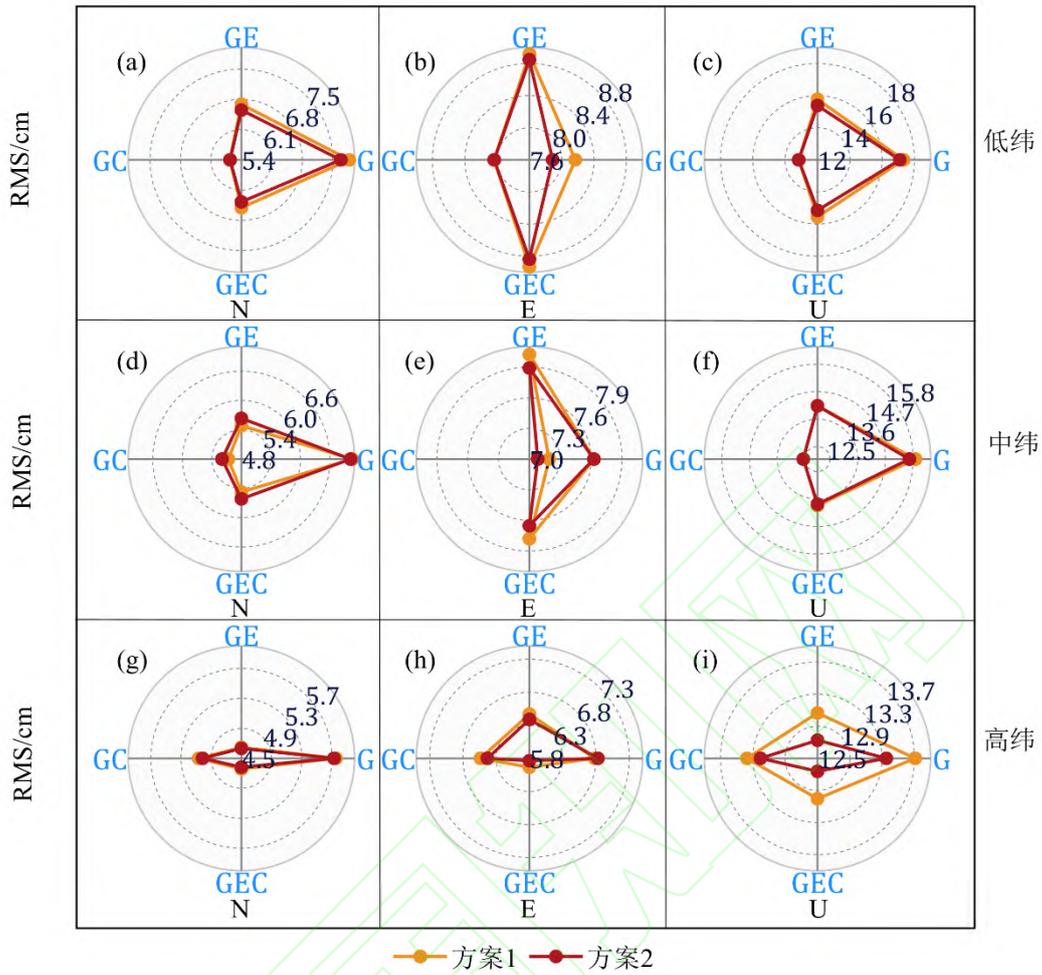


图 7 2023 年年积日 64-70 天不同纬度、不同方案及不同系统组合 N、E、U 方向所有测站定位误差

Fig.7 Positioning errors of all measurement stations in the N, E, and U directions for different latitudes, schemes, and system combinations, with an annual accumulated day of 64-70 days in 2023

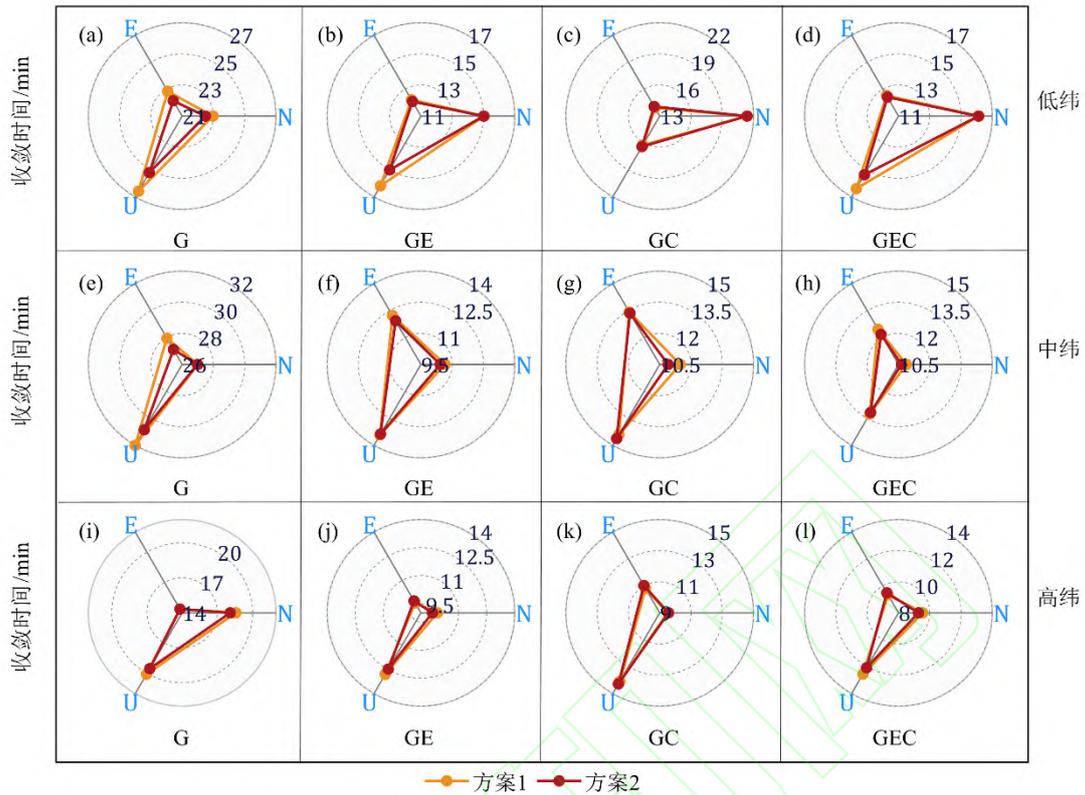


图 8 2023 年年积日 64-70 天不同纬度、不同方案及不同系统组合 N、E、U 方向所有测站收敛时间

Fig.8 Convergence times of all stations in the N, E, and U directions for different latitudes, schemes, and system combinations, with an annual product of 64-70 days in 2023

4. 结论

本文针对现有 GNSS 数据处理中未考虑对流层各向异性对定位精度和收敛速度影响的现状，提出一种顾及太阳辐射导致对流层各向异性的 RT-PPP 改进方法。引入太阳高度角表征测站卫星信号所受太阳辐射强度大小，并构建顾及对流层各向异性的 RT-PPP 函数模型和随机模型。选取 IGS 中心共 13 个测站的 multi-GNSS 数据进行解算，验证本文提出方法的优越性和鲁棒性。实验结果表明，本文提出的 RT-PPP 算法的总体定位精度在 N、E、U 三个方向上均有提高，其中在 U 方向上改善最多。在不同测站上的收敛速度均有显著改善。此外，对本文提出方法在不同纬度测站上进行验证，发现提出的 RT-PPP 方法的定位精度和收敛时间均有所提升，且受纬度影响较小，进一步验证本文方法的鲁棒性和适用性，提出方法对完善顾及对流层各向异性的 RT-PPP 理论与方法具有重要意义。

致谢：感谢 IGS 数据中心 (<https://igs.org/>) 提供的实时数据。本项目由国家自然科学基金项目 (42274039 和 42204034), 天津市轨道交通导航定位及时空大数据技术重点实验室开放课题基金 (TKL2024B03), 西安市科协青年人才托举项目(959202313075)及秦创原引用高层次创新创业人才项目(QCYRCXM-2023-107)联合资助支持。

参考文献

- [1] Wang Shengli, Wang Qing, Gao Wang, et al. IGS real-time Product Quality Analysis and its Application in real-time precision single point positioning [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(S2): 365-369. (王胜利, 王庆, 高旺, 等. IGS 实时产品质量分析及其在实时精密单点定位中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(S2): 365-369.)
- [2] Jin Shuanggen, Wang Qisheng, Shi Qiqi. Estimation and application of GNSS precision single point positioning Parameters for single-frequency to five-frequency multi-systems [J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2022,51(07): 1239-1248. (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(07): 1239-1248.)
- [3] Zhou Yaozong, Lou Yidong, Zhang Weixing, et al. Accuracy and PPP performance evaluation of a new generation of real-time tropospheric mapping function [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(12): 1881-1888. (in Chinese) DOI:10.13203/J.Whugis20210238. (周要宗, 楼益栋, 张卫星, 等. 新一代实时对流层映射函数精度及 PPP 性能评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(12): 1881-1888. DOI:10.13203/j.whugis20210238.)
- [4] Huang Lingyong, LYU Zhiping, LYU Hao, et al. Single-station modeling method of Beidou three-frequency pseudo-distance correlation stochastic model [J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2016, 45(S2): 165-171. (黄令勇, 吕志平, 吕浩, 等. 北斗三频伪距相关随机模型单站建模方法[J]. 测绘学报, 2016, 45(S2): 165-171.)
- [5] HUANG Liangke, GUO Lijie, LIU Lilong, et al. Accuracy Analysis of ZTD and ZWD Calculated from MERRA-2 Re-analysis Data over China[J]. Geomatics and

- Information Science of Wuhan University, 2023, 48(3): 416-424. DOI: 10.13203/j.whu-gis20200377(黄良珂, 郭立杰, 刘立龙, 等. 利用中国区域 MERRA-2 资料计算 ZTD 和 ZWD 的精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(03): 416-424. DOI: 10.13203/j. whugis20200377.)
- [6] Zhang Liang. Research on Key technologies and Applications of GPS Real-Time Service (RTS) products [D]. Wuhan University, 2018. DOI:10.27379/d.cnki.gwhdu.2018.000034. (张良. GPS 实时服务 (RTS) 产品关键技术及其应用研究 [D]. 武汉大学, 2018. DOI:10.27379/d.cnki.gwhdu.2018.000034.)
- [7] ZHANG Di. The study of the GNSS tropospheric zenith delay model and mapping function[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(9): 1984. DOI. 10.11947/. AGCS. 2022. 20210100 (章迪. GNSS 对流层天顶延迟模型及映射函数研究[J]. 测绘学报, 2022, 51(09): 1984. DOI. 10. 11947/. AGCS. 2022. 20210100)
- [8] Zhou Yuzong, Lou Yidong, Zhang Weixing, et al. Assessment of the Accuracy and PPP Performance of the Next-Generation Real-Time Tropospheric Mapping Functions[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(12): 188-1888. DOI: 10. 13203/j. whugis202 (周要宗, 楼益栋, 张卫星, 等. 新一代实时对流层映射函数精度及 PPP 性能评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(12): 1881-1888. DOI: 10. 13203/j. whugis20210238.)
- [9] Böhm J, Niell A, Tregoning P, et al. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data[J]. Geophysical research letters, 2006, 33(7).
- [10] Boehm J, Schuh H. Vienna mapping functions in VLBI analyses[J]. Geophysical research letters, 2004, 31(1).
- [11] Landskron D, Böhm J. VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions[J]. Journal of geodesy, 2018, 92: 349-360.
- [12] Wang Dan, Dan Peng Accuracy analysis of tropospheric empirical mapping function model [J] Radio Engineering, 2020, 50 (08): 666-671 (王丹, 淡鹏. 对流层经验映射函数模型精度分析[J]. 无线电工程, 2020, 50(08): 666-671.)
- [13] Yuan Y, Holden L, Kealy A, et al. Assessment of forecast Vienna Mapping

- Function 1 for real-time tropospheric delay modeling in GNSS[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93: 1501-1514.
- [14] Zhai Shufeng. GNSS Tropospheric delay Correction and its application [D]. Information Engineering University of Strategic Support Forces, 2018. (翟树峰. GNSS 对流层延迟改正及其应用研究[D]. 战略支援部队信息工程大学, 2018.)
- [15] Ye Kedong. Analysis of the Impact of Different Mapping Functions on Real time PPP Solution [D] Southwest Jiaotong University, 2021 DOI:10.27414/d.cnki.gxnju.2021.001664. (叶克东. 不同映射函数对实时 PPP 解算的影响分析 [D]. 西南交通大学, 2021. DOI:10.27414/d.cnki.gxnju.2021.001664.)
- [16] Zhang Xiaohong, Ding Lele. Quality Analysis of Beidou Second Generation Observations and Refinement of Stochastic Models [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38 (07): 832-836. (张小红, 丁乐乐. 北斗二代观测值质量分析及随机模型精化 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2013, 38(07): 832-836.)
- [17] Li B, Zhang L, Verhagen S. Impacts of BeiDou stochastic model on reliability: overall test, w-test and minimal detectable bias[J]. *GPS solutions*, 2017, 21: 1095-1112.
- [18] Yan Li, Li Meng, Mei Xi, et al. A stochastic model for real-time estimation of observations from different types of Beidou satellites [J] *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42 (02): 263-269 DOI:10.13203/j.whugis20141006. (严丽, 李萌, 梅熙等. 实时估计不同类型北斗卫星观测值的随机模型[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(02): 263-269. DOI:10.13203/j.whugis20141006.)
- [19] Li YAN, Dingfa H, Meng L, et al. BDS/GPS stochastic model refinement and assessment using satellite elevation angle and SNR[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2015 Proceedings: Volume I. Springer Berlin Heidelberg, 2015: 537-549.
- [20] Gerdan G P. A comparison of four methods of weighting double difference pseudorange measurements[J]. *Australian surveyor*, 1995, 40(4): 60-66.

- [21] King RW, Bock Y (2001) Documentation for the GAMIT GPS software analysis, release 10.05. Mass. Inst. of Technol. Cambridge. Atmospheric, and Planetary Science. University of California at San Diego.
- [22] Hadas T, Hobiger T, Hordyniec P. Considering different recent advancements in GNSS on real-time zenith troposphere estimates[J]. GPS Solutions, 2020, 24: 1-14.
- [23] Han S. Quality-control issues relating to instantaneous ambiguity resolution for real-time GPS kinematic positioning[J]. Journal of Geodesy, 1997, 71: 351-361.
- [24] Zhang Yanli, Zhao Jun. Analysis of spatial variation of solar shortwave radiation in complex terrain areas [J] Geography and Geographic Information Science, 2017, 33 (04): 99-106. (张彦丽, 赵军. 复杂地形区太阳短波辐射空间变异分析[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(04): 99-106.)
- [25] Li Qingquan, Liu Huizeng, Zhu Ping, etc Construction of Target Direction Correction Model for Earth Radiation Budget Detection: From Earth Satellite to Moon based Platform [J] Journal of Earth Information Science, 2023, 25 (01): 2-14. (李清泉, 刘会增, 朱平, 等. 地球辐射收支探测的目标方向订正模型构建: 从地球卫星到月基平台[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(01): 2-14.)
- [26] Qi Yue, Fang Shibo, Zhou Wenzuo Changes in surface solar radiation and its relationship with atmospheric environmental changes in eastern and western China over the past 50 years [J] Acta Physica Sinica, 2015, 64 (08): 398-407. (齐月, 房世波, 周文佐. 近 50 年来中国东、西部地面太阳辐射变化及其与大气环境变化的关系[J]. 物理学报, 2015, 64(08): 398-407.)
- [27] Xiao Ziniu, Zhong Qi, Yin Zhiqiang, et al. Research progress on the impact of interdecadal variations in solar activity on modern climate [J] Progress in Earth Science, 2013, 28 (12): 1335-1348. (肖子牛, 钟琦, 尹志强, 等. 太阳活动年代际变化对现代气候影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(12): 1335-1348.)
- [28] Tang Chaoli, Zhu Yidong, Wei Reasonable, etc The spatiotemporal variation characteristics of the temperature field at the top of the troposphere in China over the past 40 years [J] Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2023, 18

(01): 25-35. (唐超礼, 朱一东, 魏合理, 等. 近 40 年中国区域对流层顶温度场时空变化特征[J]. 大气与环境光学学报, 2023, 18(01): 25-35.)

[29] Wang Shangqi, Liu Ling, Zheng Yongfeng, etc BDS-3/Galileo Four Frequency Precise Single Point Positioning Model and Performance Analysis [J] Chinese Journal of Inertial Technology, 2024, 32 (05): 484-491 DOI: 10.13695/j. cnki. 12-1222/o3. 2024. 05. 009. (王尚祺, 刘岭, 郑勇峰, 等. BDS-3/Galileo 四频精密单点定位模型及性能分析[J]. 中国惯性技术学报, 2024, 32(05): 484-491. DOI: 10.13695/j. cnki. 12-1222/o3. 2024. 05. 009.)

[30] Yasen Jiang Kuerban, Wang Yu, Mai Mai Ti Ai, Mai Mai Ti Yiming, et al. Evolution of solar radiation over the Pamir Plateau in China [J]. Chinese Journal of Solar Energy, 2023, 44(10): 237-244. (雅森江·库尔班, 王豫, 买买提艾力·买买提依明等. 中国帕米尔高原太阳辐射演变规律[J]. 太阳能学报, 2023, 44(10): 237-244.)

[31] Kouba J. A guide to using International GNSS Service (IGS) products[J]. 2009.

[32] Kouba J. A simplified yaw-attitude model for eclipsing GPS satellites[J]. GPS solutions, 2009, 13: 1-12.

[33] Wu J T, Wu S C, Hajj G A, et al. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase[J]. Astrodynamics 1991, 1992: 1647-1660.

[34] Melbourne W G. The case for ranging in GPS-based geodetic systems[C]//Proceedings of the first international symposium on precise positioning with the Global Positioning System. US Department of Commerce Rockville, Maryland, 1985: 373-386.

[35] WüBBENA G. Software developments for geodetic positioning with GPS using TI4100 code and carrier measurements; proceedings of the first international symposium on precise positioning with the global positioning system, US Department of Commerce, Rockville, Maryland, F, 1985 [C].

[36] 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: 433-441.

[37] Du Shi, Huang Guanwen, Ge Yulong, et al. Real-time precision single point

positioning Service Performance evaluation by BNC/ RTKLIB/ PPPWIZARD [J].
Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(02): 125-130.
DOI:10.14075/j.jgg.2021.02.004. (杜石, 黄观文, 葛玉龙, 等. BNC/ RTKLIB/
PPPWIZARD 实时精密单点定位服务性能评估[J]. 大地测量与地球动力学,
2021, 41(02): 125-130. DOI:10.14075/j.jgg.2021.02.004) .

网络首发:

标题: 顾及对流层各向异性的实时 PPP 解算方法

作者: 赵庆志, 张登雄, 姚宜斌, 李祖锋, 吴侃, 高余婷, 王鹏程, 马智, 刘晨

收稿日期: 2025-01-08

DOI:10.13203/j.whugis20240175

引用格式:

赵庆志, 张登雄, 姚宜斌, 等. 顾及对流层各向异性的实时 PPP 解算方法[J].
武汉大学学报(信息科学版), 2025, DOI:10.13203/J.whugis20240175 (ZHAO
Qingzhi, ZHANG Dengxiong, YAO Yibin, et al. Real Time PPP Solution Method
Considering Tropospheric Anisotropy[J]. Geomatics and Information Science of
Wuhan University, 2025, DOI:10.13203/J.whugis20240175)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

组合 GPS/GLONASS 三频观测值的非差非组合 PPP 模糊度快速固定

章繁, 柴洪洲, 王敏, 肖国锐, 张乾坤, 杜祯强

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1900-1910.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220315>

高精度电离层产品增强 PPP-B2b 定位性能分析

宋伟伟, 宋啟晟, 何倩倩, 龚晓鹏, 辜声峰

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(9): 1517-1526.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20230030>

不同分析中心 BDS-3 姿态四元数产品比较及其在 PPP 中的应用

田福娟, 聂琳娟, 周晓慧

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1891-1899.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20230366>