**引文格式**:朱威,任晓东,张小红.不同纬度和站间距的电离层单星模型对PPP-RTK增强定位效果分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(11):2381-2390.DOI:10.13203/j.whugis20230476

**Citation**:ZHU Wei,REN Xiaodong,ZHANG Xiaohong.Performance of PPP-RTK Enhanced by Slant Ionospheric Model Based on Reference Stations with Different Latitudes and Distances[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(11):2381-2390.DOI:10.13203/j.whugis20230476

# 不同纬度和站间距的电离层单星模型对PPP-RTK增强定位效果分析

朱 威[1] 任晓东[1,2] 张小红[1,2,3]

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 湖北珞珈实验室,湖北 武汉,430079

3 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

**摘 要**:高精度电离层信息是实现全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)精密单点定位(precise point positioning,PPP)快速初始化的关键。然而,电离层斜延迟模型(slant ionospheric model,SIM)精度与建模区域位置和参考站站间距密切相关。为探讨以上因素对区域SIM精度及最终PPP-实时动态差分(real-time kinematic,RTK)定位的影响,利用欧洲GNSS参考站网和中国大陆构造环境监测网观测数据,进行区域SIM建模及PPP-RTK定位效果分析实验。实验结果表明,SIM精度与区域位置关系密切,在磁静日,欧洲中高纬度地区利用站间距417 km观测网建立的SIM精度可达到0.4 TECu,PPP-RTK水平、高程方向平均收敛时间分别可减少82%、44%;而在中国南方低纬度地区,需要站间距小于130 km才能使SIM综合精度和PPP-RTK收敛时间改善程度接近欧洲地区。不同站间距方面,只有在磁静日的高纬地区如欧洲,由于电离层总电子含量小且空间上变化缓慢,其模型精度随站间距增大才不显著下降;在发生地磁扰动时期,或地处低纬地区,SIM精度随站间距增大下降更为明显,且当站间距过大时,SIM的引入可能反而增加PPP-RTK定位收敛时间。因此在中高纬地区设立参考站时可适当扩大站间距,但同时也应考虑到在地磁扰动期间SIM性能劣化的影响;而在中国云南等低纬地区,由于电离层赤道异常区的存在,模型精度和PPP-RTK定位性能随站间距增大下降较为明显,建模时站间距不宜大于100 km,否则模型精度将无法满足需求。

**关键词**:电离层;非差非组合;精密单点定位;站间距;实时动态差分定位

**中图分类号**:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-02-23

**DOI**:10.13203/j.whugis20230476 **文章编号**:1671-8860(2025)11-2381-10

# Performance of PPP-RTK Enhanced by Slant Ionospheric Model Based on Reference Stations with Different Latitudes and Distances

*ZHU Wei*[1] *REN Xiaodong*[1,2] *ZHANG Xiaohong*[1,2,3]

1 School of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Hubei Luojia Laboratory, Wuhan 430079, China

3 China Antarctic Surveying and Mapping Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract**: **Objectives:** Precise slant ionospheric delay reference is the key to rapid initialization of global navigation satellite system (GNSS) precise point positioning (PPP). The accuracy of regional slant ionospheric model (SIM) is closely related to modeling location and between-station distance. How the above factors influence SIM accuracy and PPP-real-time kinematic (RTK) positioning is analyzed. **Methods:** Slant ionospheric delays were extracted using uncombined PPP-ambiguity resolution (AR), and the receiver code bias in them was canceled by making differences between satellites. The SIMs consisted of polynomial

**基金项目**:国家重点研发计划(2022YFB3903902);国家自然科学基金(42388102,42230104);中央高校基本科研业务费专项资金(2042025kf0026)。

**第一作者**:朱威,硕士,主要研究方向为精密单点定位。wzhusgg@whu.edu.cn

**通信作者**:任晓东,博士,教授。xdren@whu.edu.cn

functions and residual grids and were constructed under different between-station distance conditions. Then we assessed accuracies of SIM and used them for PPP-RTK positioning to inspect improvement compared with PPP-AR. **Results:** The experiments were conducted in Europe and Yunnan Province, China, respectively, which were very different in latitudes. During the magnetically quiet days, with an average between-station distance of 417 km in Europe, the external accuracy was better than 0.4 TECu overall and the PPP-RTK solutions reduced horizontal and vertical convergence time by 82% and 44% respectively. In Yunnan Province, China, only when the average between-station distance was less than 130 km could the external accuracies and the PPP-RTK enhancement approach those of Europe. In terms of between-station distance, the SIM accuracies showed slight differences when it expanded to 611 km in Europe during the magnetically quiet days, whereas an evident trend of decreasing model accuracy with increasing between-station distance occurred during the magnetic storm or in Yunnan Province, China. **Conclusions:** For regional ionospheric modeling in mid-to-high latitude regions such as Europe, the ionosphere is spatially smooth enough, and the between-station distance there can expand appropriately but not too much in case of PPP-RTK degradation during magnetic disturbance. While in low latitude regions such as Yunnan Province, due to the equatorial ionization anomaly, we do not recommend between-station distance to be larger than 100 km, otherwise the model accuracy can not meet the users' demand.

**Key words**: ionosphere; undifferenced and uncombined; precise point positioning; between-station distance; real-time kinematic positioning

精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术有低成本、高精度、可提供绝对位置等优点,但其较长的初始化和重收敛时间限制了其实际应用场景[1]。PPP收敛速度慢的一个重要原因是全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)卫星空间几何构型变化较慢[2]。传统的无电离层组合PPP通过不同频率观测值的线性组合消去电离层,等价于视电离层为白噪声参数,未充分利用其时域特性。非组合PPP为每个卫星设置一个电离层参数并滤波估计,但电离层参数与模糊度参数的分离仍需要一定时间。

近年来逐渐发展的PPP-实时动态差分(real-time kinematic, RTK)技术利用区域连续运行参考站(continuously operating reference station, CORS)网提供的多种状态域改正数实现PPP的快速收敛,从而为用户提供广域快速定位服务,目前已成为国际卫星导航领域的前沿和热点方向[3-6]。PPP-RTK一般采用非组合PPP的观测模型,其实现关键在于高精度的电离层信息[7-8],利用多个CORS站提取的电离层延迟量构建电离层延迟产品并播发给用户,以约束用户站电离层参数,实现电离层参数与模糊度参数的快速解耦与定位快速收敛[9-10]。

目前,网络RTK(network RTK, NRTK)技术一般要求基准站站间距不超过70 km,但由于PPP-RTK技术将大气产品与卫星偏差产品分离,并在状态域对大气参数和模糊度参数分别约束,其对站间距的要求比NRTK更低[11-13]。在综合考虑PPP-RTK方案建设成本、最终实现效果时,服务端测站站间距是一个重要因素[14]。服务端测站站间距究竟需要小于多少才能满足用户需求,当服务端测站密度不足时,PPP-RTK性能将如何变化?本文分别以欧洲和中国云南地区作为高纬地区和低纬地区代表,分析在不同站间距条件下的电离层斜延迟模型(slant ionosphric model, SIM)精度和PPP-RTK定位性能,为可靠、稳定的PPP-RTK定位实现提供重要参考。

## 1 电离层延迟提取与建模方法

### 1.1 非组合PPP观测方程

非组合PPP的观测方程通常可表达为:

$$\begin{cases} p^s_{r,n}+\overline{t}^s_{\mathrm{IF}}=\rho^s_r+\hat{t}_r+\gamma_n\cdot\hat{I}^s_{r,1}+m^s_r\cdot Z_r+e^s_{r,n} \\ l^s_{r,n}+\overline{t}^s_{\mathrm{IF}}=\rho^s_r+\hat{t}_r-\gamma_n\cdot\hat{I}^s_{r,1}+m^s_r\cdot Z_r+ \\ \qquad\qquad \lambda_n\hat{N}^s_{r,n}+\varepsilon^s_{r,n} \end{cases} \tag{1}$$

式中,上标$s$和下标$r$分别表示该项与卫星$s$和接收机$r$有关;下标$n$为频率代号;$p^s_{r,n}$和$l^s_{r,n}$分别为经过天线误差改正、相对论效应改正、潮汐改正等误差模型改正后的伪距和相位观测值;$\rho^s_r$为站星几何距离;$\overline{t}^s_{\mathrm{IF}}$和$\hat{t}_r$分别为精密卫星钟差产品和待估接收机钟差参数,两者分别包含了卫星和接

收机伪距硬件延迟的无电离层组合值;$\gamma_n$为电离层延迟在频率间的转换系数,其与频率$f_n$的关系为$\gamma_n=f_1^2/f_n^2$;$\hat{N}_{r,n}^s$为重参数化后的模糊度参数;$m_r^s$为对流层投影函数;$Z_r$为天顶对流层延迟;$\lambda_n$为载波波长;$e_{r,n}^s$和$\varepsilon_{r,n}^s$分别为伪距和相位观测噪声及多路径等其余未被模型化误差的总和;$\hat{I}_{r,1}^s$为电离层延迟参数,其参数含义为:

$$\hat{I}_{r,1}^s=I_{r,1}^s+\beta\left(\mathrm{DCB}_{r,12}-\mathrm{DCB}_{12}^s\right) \tag{2}$$

$$\beta=-f_2^2/\left(f_1^2-f_2^2\right) \tag{3}$$

式中,$I_{r,1}^s$为第一频率信号上真实的电离层延迟;$\mathrm{DCB}_{r,12}=d_{r,1}-d_{r,2}$和$\mathrm{DCB}_{12}^s=d_1^s-d_2^s$分别为接收机端和卫星端差分码偏差(differential code bias,DCB),其中$d_{r,i}$和$d_i^s$($i$=1,2)分别为接收机和卫星在频率$i$上的伪距硬件延迟。

为提高电离层斜延迟的估计精度,在PPP解算时使用了法国空间研究中心的事后绝对信号偏差(observation-specific bias,OSB)产品进行模糊度固定[15]。经过OSB产品改正后,电离层估计值中将不再包含卫星DCB[16]。接收机DCB受接收机型号、固件版本、运行时间、环境温度等因素影响,无法保证所有参考站的接收机DCB相同,这就有可能破坏提取值$\hat{I}_{r,1}^s$理想情况下与$I_{r,1}^s$相同的空间特性。

### 1.2　电离层斜延迟模型

#### 1.2.1　星间单差多项式模型

本文采用星间单差的方式来避免接收机DCB的影响[17]。选取高度角最高的卫星为基准星,其余卫星的电离层提取值与基准星作差,即:

$$\Delta\hat{I}_{r,1}^s=\hat{I}_{r,1}^s-\hat{I}_{r,1}^{\mathrm{base}}=I_{r,1}^s-I_{r,1}^{\mathrm{base}} \tag{4}$$

式中,上标base表示基准星。由于接收机DCB与卫星系统有关,在多系统建模时需为每个卫星系统分别选取基准星。

在空间域上用多项式对电离层斜延迟拟合,多项式阶数可以根据建模区域的大小调整,其表达形式如下:

$$\mathrm{STEC}^s(\varphi,\lambda)=\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}E_{ij}^s\left(\varphi-\varphi_0^s\right)^i\left(\lambda-\lambda_0^s\right)^j \tag{5}$$

式中,$\varphi$和$\lambda$为模型区域内任意一处电离层穿刺点的纬度和经度;$\varphi_0^s$和$\lambda_0^s$分别为卫星$s$所有斜延迟穿刺点的平均纬度和平均经度;$E_{ij}^s$为纬度$i$次且经度$j$次项对应的系数;$\mathrm{STEC}^s$为卫星$s$对应穿刺点处电离层斜路径总电子含量(slant total electron content,STEC),其与电离层延迟$I$的关系为:

$$I=\frac{40.3}{f^2}\mathrm{STEC} \tag{6}$$

在计算穿刺点位置时,假设地球半径为6 371 km,电离层为单层薄球壳且高度为450 km。需要注意的是,虽然在计算穿刺点时将电离层视为单层薄球壳,但这只是为了将电离层延迟归算到同一高度的平面上,在估计方法上并未对模型造成精度损失。若卫星$s$和基准星有$N$个共视测站,则可列出包含$N$个方程的方程组:

$$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{HX} \tag{7}$$

式中,$\boldsymbol{L}$为$N$个测站的单差STEC组成的向量,$\boldsymbol{L}=[\ \mathrm{STEC}_1^s\quad\mathrm{STEC}_2^s\quad\cdots\quad\mathrm{STEC}_N^s\ ]^{\mathrm{T}}$;$\boldsymbol{X}$为待估的多项式系数;$\boldsymbol{H}$为系数矩阵,由各穿刺点与平均穿刺点的经纬度差异计算而来。

$\mathrm{STEC}_i^s$的标准差$\sigma_{i,\mathrm{STEC}}^s$源于服务端测站PPP解算时滤波方差阵中电离层斜延迟参数标准差$\sigma_{i,I}^s$,两者关系与式(6)一致。另外,为充分利用各测站的STEC观测值,将模糊度未固定的卫星STEC均纳入建模,但将其方差放大至原来的2倍。假设$\boldsymbol{L}$中各观测值互相独立,则$L$的方差阵$\boldsymbol{R}$表示为:

$$\boldsymbol{R}=\mathrm{diag}\left((\sigma_{1,\mathrm{STEC}}^s)^2\quad(\sigma_{2,\mathrm{STEC}}^s)^2\quad\cdots\quad(\sigma_{N,\mathrm{STEC}}^s)^2\right) \tag{8}$$

根据式(7)、式(8)进行加权最小二乘估计即可得到多项式系数的估计值。由于建模观测值为星间单差的STEC,模型估计值的含义也变为各卫星原本不做星间单差估计的多项式系数相对于基准星的差值。为方便后续处理,在星间单差模型中基准星的模型值设置为0。

#### 1.2.2　电离层格网点残差模型

最小二乘估计的验后残差中包含了多项式无法完全拟合的电离层特征,将这些残差值建模并播发给用户一定程度上可提高电离层模型性能,即用户最终得到的电离层斜延迟参考值为多项式模型值与残差模型值之和。

为了保护服务端测站位置的隐私性,通常采用格网形式播发残差值。本文生成格点值的策略为:选取离格点最近的3个穿刺点,然后使用反距离内插算法计算格点值,即:

$$v_{\mathrm{grid}}=\sum_{i=1}^{3}\frac{v_i}{d_i}\Big/\sum_{i=1}^{3}\frac{1}{d_i} \tag{9}$$

式中,$v_{\mathrm{grid}}$为任意某一格点的播发值;$v_i$($i$=1,2,3)为离该格点最近的3个穿刺点的残差值;$d_i$为对应穿刺点到该格点的距离。格网的分辨率可根据站间距大小设置。

用户接收到残差格网后先根据当前定位概略坐标和卫星位置计算电离层穿刺点位置,找到在格网中所处的方格,然后使用双线性内插方法计算出当前位置的残差。

### 1.3 电离层约束方程

本文在用户端实现PPP-RTK方法为在非组合PPP-模糊度解算(ambiguity resolution, AR)基础上添加电离层约束方程,利用服务端构建的SIM计算模型值,然后构建电离层观测方程输入到卡尔曼滤波器中以更新待估参数。未知的用户端接收机DCB处理方式和服务端一致,即通过星间单差消除。电离层虚拟观测方程为:

$$I^s_{\text{model}}-I^{\text{base}}_{\text{model}}=\hat{I}^s_{r,1}-\hat{I}^{\text{base}}_{r,1}\sim N\left(0,(\sigma^s_{\text{model}})^2\right) \tag{10}$$

式中,下标model代表模型值。方差$(\sigma^s_{\text{model}})^2$采用高度角加权模型:

$$(\sigma^s_{\text{model}})^2=\sigma_0^2\left(1+\frac{1}{\sin^2 e}\right) \tag{11}$$

$\sigma_0$为电离层约束方差权因子,本文根据事后统计的外符合精度设置该值;$e$为卫星$s$的高度角。通常假设各卫星的模型值之间互相独立。

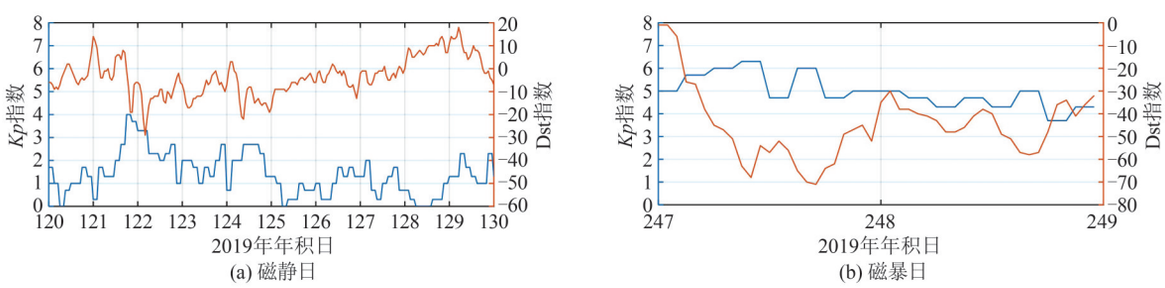



图1 数据日期内Dst指数和$Kp$指数序列

Fig. 1 Dst Indices and $Kp$ Indices Within the Data Date

## 2 实验数据与处理策略

本文分别选取了欧洲GNSS参考站网络和中国大陆构造环境监测网络(crustal movement observation network of China, CMONOC)在云南省及周边地区的测站数据进行电离层建模和PPP-RTK定位实验。所选时间段为2019年年积日120—129天,期间地磁活动水平较低;此外选取有磁暴发生的2022年年积日247—248天作为对比。地磁指数(Dst和$Kp$)序列如图1所示。

实验在不同服务端测站站间距条件下进行,相关设置及数据观测值等信息如表1所示。其中建模阶数$n$和$m$的含义与式(5)中的相同,则欧洲地区进行电离层建模最少需要12个测站,中国云南地区最少需要6个测站。考虑到电离层在纬度方向上的梯度比在经度方向上大,则纬度项最高次数比经度项最高次数高1[18]。测站分布如图2和图3所示。

**表1 实验参数配置**

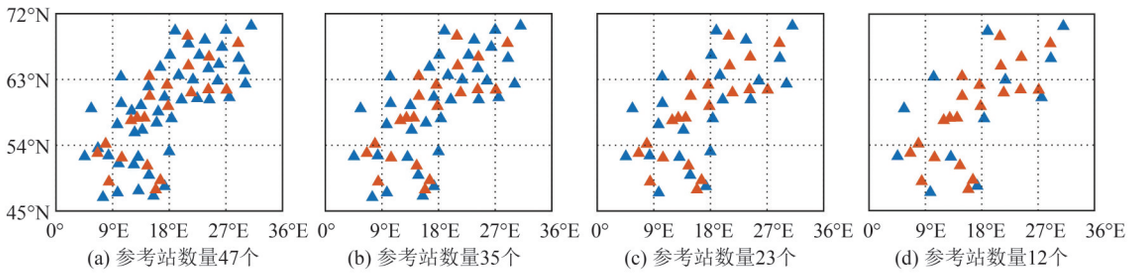
Table 1 Experimental Parameter Configuration

| 地区 | 观测值频点 | 观测值采样率/s | 服务端测站数/个 | 平均站间距/km | 用户站数量 | 建模阶数 $n$ | 建模阶数 $m$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 欧洲地区 | GPS L1/L2; Galileo E1/E5a; BDS B1I/B3I | 30 | 47 | 417 | 21 | 3 | 2 |
| | | | 35 | 486 | | | |
| | | | 23 | 611 | | | |
| | | | 12 | 862 | | | |
| 中国云南地区 | GPS L1/L2; GLONASS G1/G2 | 30 | 30 | 130 | 13 | 2 | 1 |
| | | | 21 | 149 | | | |
| | | | 12 | 190 | | | |
| | | | 6 | 300 | | | |

本文PPP定位处理策略见表2。服务端测站使用静态PPP-AR提取高精度STEC,为逐历元电离层建模提供数据来源,也是后续评估电离层模型内符合精度的基础。用户端则先执行静态非组合PPP-AR提取自身STEC,与模型值对比计算模型外符合精度,然后分别进行仿动态PPP-AR与PPP-RTK解算,以验证电离层单差斜延迟模型的定位加速性能。为了充分利用用户站观测数据,在仿动态解算时将一天数据划分为多个2 h片段。

## 3 实验结果分析

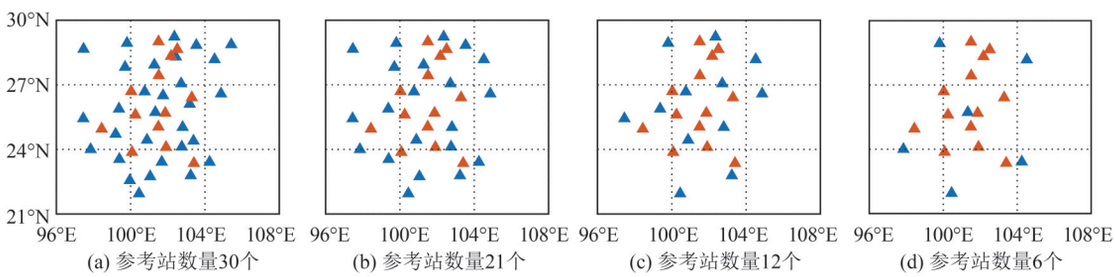
实验结果将从电离层单差斜延迟模型内、外符合精度和PPP-RTK定位效果两个方面来分析。模型内符合精度定义为服务端参考站自身提取的STEC与对应模型值之差的均方根(root mean square, RMS);外符合精度定义为用户站提取的斜延迟与模型值之差的RMS。为尽量避免服务端测站定位未收敛对统计结果带来的影响,每天UTC 4:00前的建模结果将被剔除,后续定位性能分析也将排除这部分数据。




(a) 参考站数量47个　(b) 参考站数量35个　(c) 参考站数量23个　(d) 参考站数量12个

图2　欧洲地区参考站(蓝)与21个用户站(红)分布

Fig. 2　Distribution of Server Stations (Blue) and 21 User Stations (Red) in Experiment in Europe




(a) 参考站数量30个　(b) 参考站数量21个　(c) 参考站数量12个　(d) 参考站数量6个

图3　中国云南地区参考站(蓝)与13个用户站(红)分布

Fig. 3　Distribution of Server Stations (Blue) and User Stations (Red) in Experiment in Yunnan Province, China

**表2　非差非组合PPP策略**

Table 2　Undifferenced and Uncombined PPP Solution Strategy

| 项目 | 策略 |
|---|---|
| 截止高度角 | 服务端8°,用户端10° |
| 轨道钟差产品 | 德国地学中心多系统快速产品 |
| 坐标估计 | 静态常数估计,动态白噪声估计 |
| 电离层延迟 | 服务端白噪声估计,用户端随机游走 |
| 对流层延迟 | 干延迟改正采用Saastamoinen模型,天顶湿延迟用GMF投影函数估计 |
| 相位模糊度 | 随机常数估计;发生周跳后重新估计 |
| 部分模糊度固定 | Ratio值检验阈值为2,若未通过检验,逐个剔除卫星再尝试固定,剔除顺序为上个历元未固定的卫星、高度角最低的卫星,最少固定3颗卫星 |
| 天线误差 | 使用igs14.atx改正天线相位中心偏差、天线相位中心变化 |

注:GMF(global mapping function):全球投影函数。

定位性能以收敛时间为评判标准,各方向定位收敛标准定义为水平方向误差小于0.1 m,高程方向误差小于0.2 m,且持续至少5个历元,三维收敛则要求水平和高程方向同时满足收敛条件。

### 3.1　欧洲地区实验

图4展示了在2019年年积日120—129天磁静日分别使用47、35、23、12个参考站建立电离层模型的内符合RMS,对应模型命名为SIM-$n$($n$为参考站数量),图5则展示了相应的外符合RMS。2019年年积日120—129天磁静日与2022年年积日247—248天磁暴期间各卫星系统的模型精度统计结果见表3。

通常由于电离层延迟具有空间相关性,在站间距扩大后参考站与用户站的电离层差异将增大,SIM外符合RMS也将增大,但在欧洲地区,磁静日的SIM-47、SIM-35、SIM-23的外符合RMS非常接近,直到SIM-12外符合RMS才有一定增大,说明欧洲上空电离层较为平缓;在磁暴日,SIM外符合RMS随站间距扩大而增大的趋势较为显著,尤其是从SIM-23到SIM-12。内符合RMS随参考站数量减少反而减小,这可能是因为函数拟合能力不变的情况下,冗余观测值越少,建模残差也就越小,且更稀疏的测站意味着参考站对附近残差格点的贡献更大,再由残差格点内插参考站当地的残差值时更接近实际的建模残差。当参考站数量恰好等于多项式系数个数时,方程(7)没有冗余观测值,残差为0,因此SIM-12的内符合RMS几乎为0。

各系统建模精度中,Galileo和GPS精度基本相当,Galileo略优,北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system,BDS)较差是因为数据日期范围内GBM轨道钟差产品中尚未支持BDS-3系统,实验中只使用到BDS-2卫星。BDS-2主要为亚太地区服务,在欧洲地区可用卫星数较少,分布较差,且大多为地球同步轨道卫星,轨道精度较差,使得BDS-2卫星的STEC提

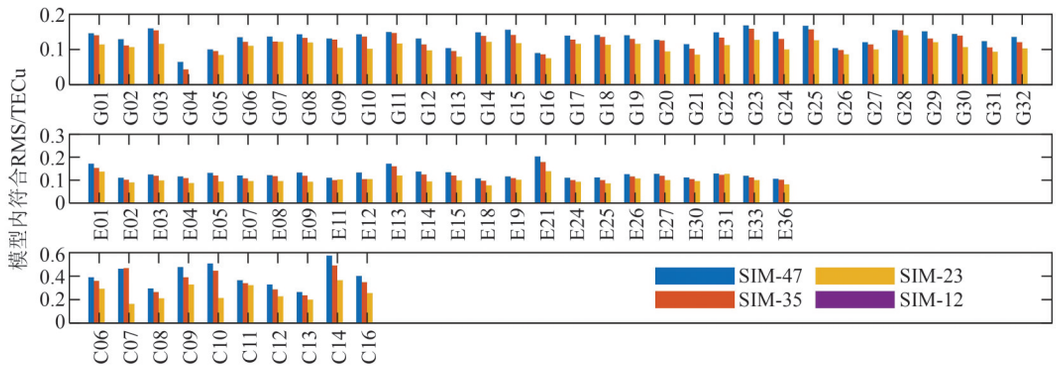



图4 磁静日欧洲地区电离层单星建模内符合精度

Fig. 4 Internal SIM Accuracy in Europe During Magnetically Quiet Day

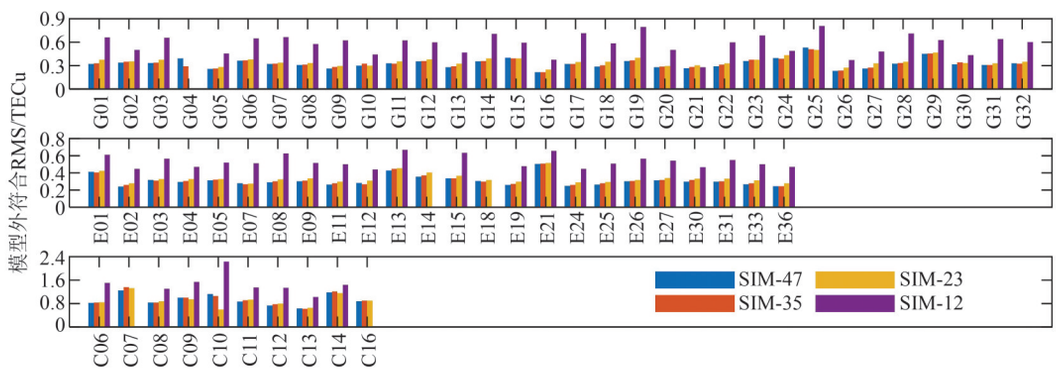



图5 磁静日欧洲地区电离层单星建模外符合精度

Fig. 5 External SIM Accuracy in Europe During Magnetically Quiet Day

**表3 欧洲地区各卫星系统模型精度/TECu**

Table 3 Model Accuracy of GNSS Systems in Europe/TECu

| 模型 | 磁静日内符合RMS | | | 磁静日外符合RMS | | | 磁暴日内符合RMS | | | 磁暴日外符合RMS | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | GPS | Galileo | BDS | GPS | Galileo | BDS | GPS | Galileo | BDS | GPS | Galileo | BDS |
| SIM-47 | 0.14 | 0.13 | 0.38 | 0.32 | 0.31 | 0.86 | 0.28 | 0.24 | 0.56 | 0.66 | 0.62 | 0.98 |
| SIM-35 | 0.13 | 0.12 | 0.34 | 0.33 | 0.32 | 0.87 | 0.26 | 0.23 | 0.51 | 0.71 | 0.69 | 1.04 |
| SIM-23 | 0.16 | 0.14 | 0.36 | 0.36 | 0.33 | 0.88 | 0.21 | 0.18 | 0.41 | 0.75 | 0.74 | 1.10 |
| SIM-12 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.60 | 0.54 | 1.36 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 1.16 | 1.11 | 0.94 |

取精度不如GPS和Galileo系统,在建模过程中因质量控制被剔除的数据也更多。

图6为用户站OST6所有算例的三维收敛时间,PPP-RTK-*n*为使用SIM-*n*进行电离层约束的PPP-RTK定位结果。在磁静日的大部分算例中,PPP-RTK收敛时间都要大幅短于PPP-AR,但少部分PPP-RTK-12差于PPP-AR;磁暴日的算例中,PPP-RTK差于PPP-AR的比例有所上升,表明SIM在用户端与真实情况相差较大,再用于电离层约束将对PPP收敛起负作用。

图7展示了PPP-AR和PPP-RTK的第68百分位定位误差序列。30 min之后定位误差均趋于平稳,为方便观察收敛情况,图7只展示了2 h数据片段的前30 min。在磁静日,对于PPP-RTK,参考站数量分别为47、35、23时的解算结果没有太大区别,在68%置信度下,水平与高程方向分别在第2、6个历元即可收敛,参考站数量降至12时,收敛时间有一定增加;在磁暴日,PPP-RTK定位误差收敛明显慢于磁静日,其中PPP-RTK-12已经失去定位加速效果,PPP-AR则受影响不大。在能够加快定位误差收敛情况下,PPP-RTK对东(E)方向的提升最大,其次是北(N)方向,提升最少的是高程(U)方向,这与文献[19-20]中的实验结果相吻合。

平均收敛时间统计结果如表4所示。在磁静日,相较PPP-AR,PPP-RTK-47在水平方向的收敛时间减少约82%,高程方向减少约44%,三维收敛时间减少约67%,随着参考站数量减少,收敛时间逐渐增加,直到略小于PPP-AR;在磁暴

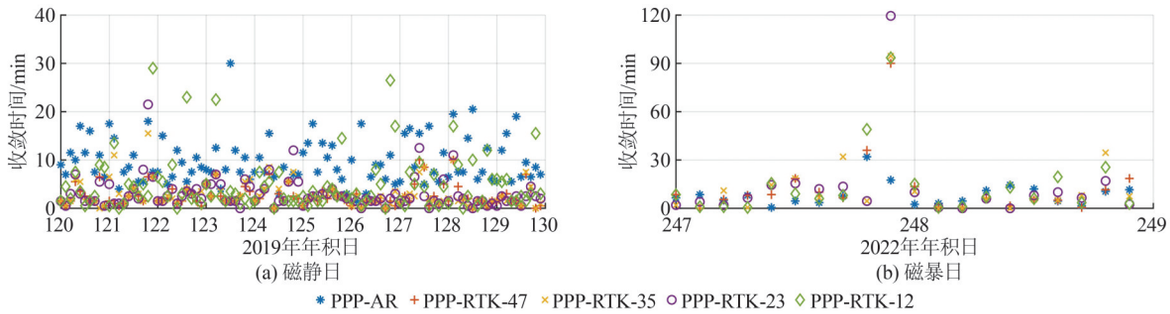



图 6　OST6站各算例收敛时间

Fig. 6　Convergence Time of Station OST6

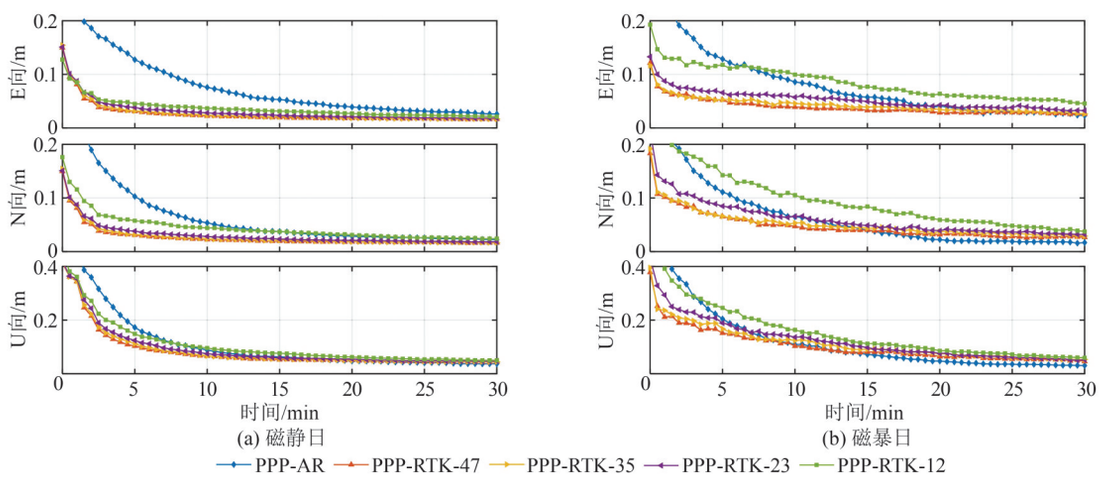



图 7　欧洲地区用户站第 68 百分位定位误差

Fig. 7　The 68th Percentile Positioning Error for Users in Europe

**表 4　欧洲地区实验平均收敛时间统计结果**/min

Table 4　Statistics of Average Convergence Time in Europe/min

| 统计项 | 磁静日平均收敛时间 | | | 磁暴日平均收敛时间 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 水平方向 | 高程方向 | 三维方向 | 水平方向 | 高程方向 | 三维方向 |
| PPP-AR | 8.5 | 4.1 | 9.4 | 9.9 | 4.5 | 10.8 |
| PPP-RTK-47 | 1.5 | 2.3 | 3.1 | 6.7 | 3.4 | 8.5 |
| PPP-RTK-35 | 1.9 | 2.6 | 3.5 | 6.6 | 3.9 | 8.5 |
| PPP-RTK-23 | 2.5 | 2.9 | 4.4 | 9.5 | 4.6 | 11.6 |
| PPP-RTK-12 | 5.1 | 4.0 | 7.3 | 15.5 | 6.3 | 17.2 |

日,PPP-AR平均收敛时间仅略微增加,但PPP-RTK收敛时间已改善不多,甚至起负作用。

### 3.2　中国云南地区实验

图8和图9分别展示了磁静日云南地区各卫星的SIM内、外符合精度。磁静日与磁暴日各卫星系统的综合建模精度统计值如表5所示。在中国云南地区,电离层模型内、外符合精度随参考站数量变化趋势与欧洲地区实验结果一致,但是在云南地区这种变化速度更为显著。相比于欧洲地区,中国云南地区实验站间距要小得多,但模型精度却差于欧洲地区实验。一方面,CMONOC观测值只包含GPS和GLONASS系统,且GLONASS系统未固定模糊度,限制了其STEC提取精度;另一方面,中国云南地区纬度更低,21°N～30°N的建模范围正好位于赤道电离层异常区附近,电离层中不规则结构更多[21],空间相关性降低。

用户站XIAG各算例的三维收敛时间如图10所示。在各解算结果中,PPP-RTK-30表现最好,三维收敛时间为4.11 min,PPP-AR最久,为12.9 min。PPP-RTK-6在部分算例中的表现甚至差于PPP-AR,远大于30 min,可以发现这些算例均处于当地时12时至16时,正是一天中太阳活动最强的时间段。

第68百分位定位误差的结果如图11所示,无论是在磁静日还是磁暴日,所有序列中都是PPP-RTK-30最优,PPP-RTK-21和PPP-RTK-12与之非常相近,而当测站数减少到6,第68百分位定位误差在各方向均有增大,此时向PPP-AR引入电离层约束只能在初始一段时间内有所改善,之后反而会使定位精度降低,导致收敛时间长于PPP-AR。

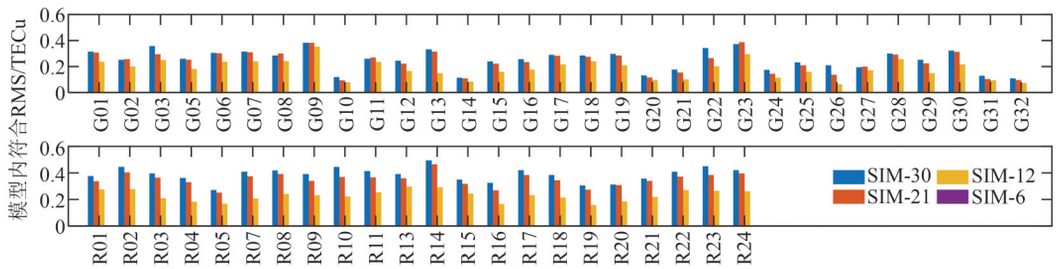



图8 磁静日中国云南地区建模内符合精度

Fig. 8 Internal Model Accuracy in Yunnan Province, China During Magnetically Quiet Day

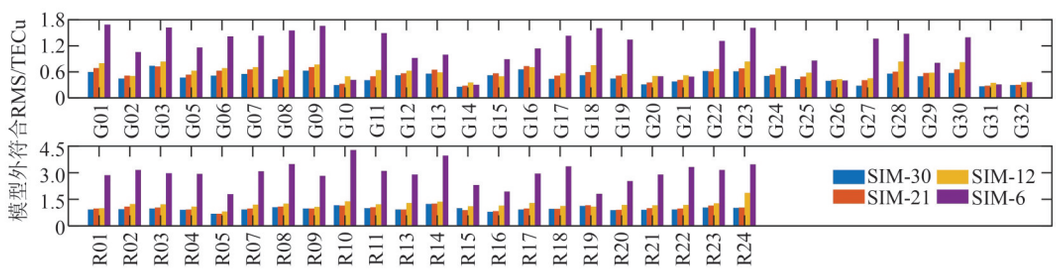



图9 磁静日中国云南地区建模外符合精度

Fig. 9 External Model Accuracy in Yunnan Province, China During Magnetically Quiet Day

**表5 中国云南地区各卫星系统模型精度/TECu**

Table 5 Model Accuracy of GNSS Systems in Yunnan Province, China/TECu

| 模型 | 磁静日内符合RMS | | 磁静日外符合RMS | | 磁暴日内符合RMS | | 磁暴日外符合RMS | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | GPS | GLONASS | GPS | GLONASS | GPS | GLONASS | GPS | GLONASS |
| SIM-30 | 0.26 | 0.39 | 0.48 | 0.97 | 0.30 | 0.43 | 0.54 | 0.88 |
| SIM-21 | 0.24 | 0.35 | 0.54 | 1.00 | 0.25 | 0.35 | 0.60 | 0.94 |
| SIM-12 | 0.19 | 0.23 | 0.62 | 1.21 | 0.21 | 0.24 | 0.66 | 1.07 |
| SIM-6 | 0.01 | 0.01 | 1.17 | 3.03 | 0.01 | 0.01 | 1.39 | 2.39 |

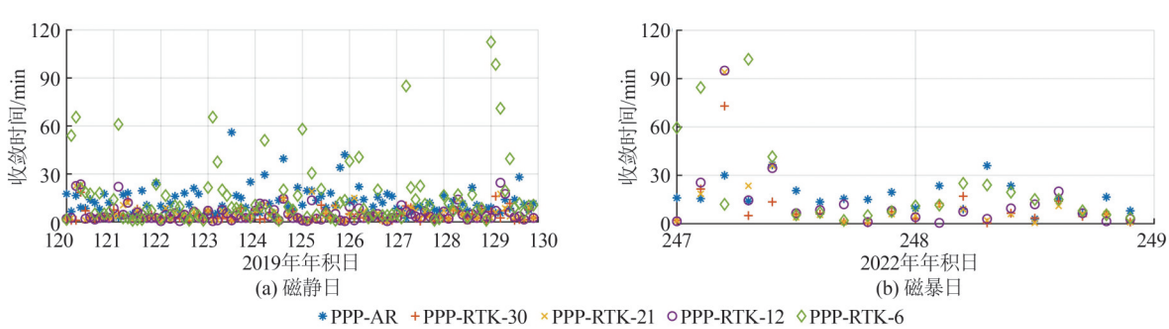



图10 XIAG站各算例收敛时间

Fig. 10 Convergence Time of Station XIAG

所有算例的平均收敛时间统计结果如表6所示。PPP-RTK在磁静日的水平方向的平均收敛时间约为在磁暴日的1/2,然而在地磁活跃程度迥异的情况下,第68百分位定位误差序列却相差不大,可见,即使在磁静日,中国云南地区的电离层活跃程度也不低,而磁暴的发生会使得部分算例的收敛时间剧增,其余算例则可能仅受轻微影响。

## 4 结 语

电离层建模所在地区和服务端测站站间距是影响电离层建模精度和最终PPP-RTK实现效果的重要因素。本文主要分别在磁静日的欧洲地区和与中国云南地区评估了在不同服务端测站站间距条件下SIM内、外符合精度和PPP-RTK定位效果,并对磁暴期间的实验结果也进行了分析对比。

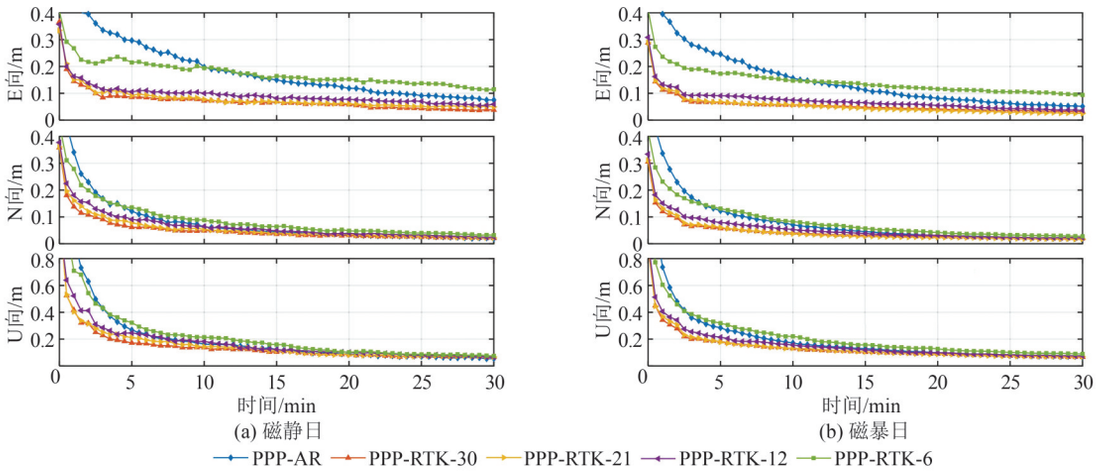



图 11　中国云南地区用户站第 68 百分位定位误差

Fig. 11　The 68th Percentile Positioning Error for Users in Yunnan Province, China

**表 6　中国云南地区实验平均收敛时间统计结果**/min

Table 6　Statistics of Average Convergence Time in Yunnan Province, China/min

| 统计项 | 磁静日平均收敛时间 | | | 磁暴日平均收敛时间 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 水平方向 | 高程方向 | 三维方向 | 水平方向 | 高程方向 | 三维方向 |
| PPP-AR | 14.7 | 7.5 | 17.4 | 17.1 | 7.6 | 19.4 |
| PPP-RTK-30 | 4.1 | 4.9 | 7.3 | 9.0 | 4.7 | 11.4 |
| PPP-RTK-21 | 5.4 | 4.6 | 8.2 | 11.2 | 5.5 | 14.5 |
| PPP-RTK-12 | 8.5 | 5.1 | 11.7 | 15.4 | 6.0 | 18.1 |
| PPP-RTK-6 | 15.5 | 7.3 | 18.7 | 27.2 | 9.7 | 31.1 |

在磁静日,欧洲地区服务端参考站平均站间距分别为417、486、611 km时,三者建立的模型精度没有明显差别,对应的PPP-RTK定位性能也相近,平均站间距增加到862 km后,SIM外符合RMS有所增大,但对PPP仍有加速收敛作用;在中国云南地区,服务端参考站平均站间距从130 km逐步扩大至300 km,外符合RMS也逐步增大,定位加速性能逐渐衰减,直到最终收敛时间久于PPP-AR。在磁暴日,欧洲和中国云南地区SIM外符合精度与PPP-RTK定位性能差于磁静日,甚至可能增加PPP收敛时间。这种磁静日与磁暴日的差异在低纬地区更小,意味着低纬地区在磁静日的电离层活跃程度也较高。

电离层建模区域范围不变时,模型外符合精度随服务端测站站间距扩大而降低,内符合精度却随之升高。这反映出在电离层模型中内符合方差普遍虚高的现象[7]。综合欧洲地区和中国云南地区的实验,若要利用参考站网建立电离层区域模型来实现PPP-RTK,在欧洲等高纬地区可以适当扩大站间距,模型精度不会迅速下降至不可接受,但也应综合考虑地磁扰动乃至磁暴事件的影响。而在诸如中国云南等低纬地区,即使在太阳活动低年,电离层的活跃程度也不可低估,站间距不可过大,否则可能无法满足PPP-RTK快速定位需求。

## 参　考　文　献

[1] 张小红, 李星星, 李盼. GNSS精密单点定位技术及应用进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1399-1407.
ZHANG Xiaohong, LI Xingxing, LI Pan. Review of GNSS PPP and Its Application[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1399-1407.

[2] GENG J H. Rapid Integer Ambiguity Resolution in GPS Precise Point Positioning[D]. Nottingham: University of Nottingham, 2011.

[3] WABBENA G, SCHMITZ M, BAGGE A. PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks[C]//The 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, LongBeach, CA, USA, 2005.

[4] ZHANG X H, REN X D, CHEN J, et al. Investigating GNSS PPP-RTK with External Ionospheric Constraints[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 6.

[5] GENG J H, ZENG R, GUO J. Assessing All-Frequency GPS/Galileo/BDS PPP-RTK in GNSS Challenging Environments[J]. *GPS Solutions*, 2023, 28(1): 5.

[6] LYU Z T, GAO Y. PPP-RTK with Augmentation from a Single Reference Station[J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(6): 40.

[7] 张小红, 胡家欢, 任晓东. PPP/PPP-RTK新进展与北斗/GNSS PPP定位性能比较[J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1084-1100.
ZHANG Xiaohong, HU Jiahuan, REN Xiaodong. New Progress of PPP/PPP-RTK and Positioning

Performance Comparison of BDS/GNSS PPP[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(9): 1084-1100.

[8] ZHA J P, ZHANG B C, LIU T, et al. Ionosphere-Weighted Undifferenced and Uncombined PPP-RTK: Theoretical Models and Experimental Results[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(4): 135.

[9] TEUNISSEN P J G, ODIJK D, ZHANG B C. PPP-RTK: Results of CORS Network-Based PPP with Integer Ambiguity Resolution[J]. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation, Series A*, 2010, 42: 223-229.

[10] LI X X, ZHANG X H, GE M R. Regional Reference Network Augmented Precise Point Positioning for Instantaneous Ambiguity Resolution[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(3): 151-158.

[11] LI Y H, GAO Y. Fast PPP Ambiguity Resolution Using a Sparse Regional Reference Network[M]// China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2014 Proceedings: Volume III. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014: 327-343.

[12] CUI B B, JIANG X Y, WANG J G, et al. A New Large-Area Hierarchical PPP-RTK Service Strategy[J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(3): 134.

[13] 李博峰, 苗维凯, 陈广鄂. 多频多模GNSS高精度定位关键技术与挑战[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(11): 1769-1783.
LI Bofeng, MIAO Weikai, CHEN Guang'e. Key Technologies and Challenges of Multi-Frequency and Multi-GNSS High-Precision Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(11): 1769-1783.

[14] HU J H, CUI B B, LI P, et al. Exploring the Role of PPP-RTK Network Configuration: A Balance of Server Budget and User Performance[J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(4): 184.

[15] LAURICHESSE D, BLOT A. Fast PPP Convergence Using Multi-Constellation and Triple-Frequency Ambiguity Resolution[C]// The 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, Oregon, USA, 2016.

[16] 赵齐乐, 陶钧, 郭靖, 等. 广域瞬时厘米级精密单点定位和服务系统[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1058-1069.
ZHAO Qile, TAO Jun, GUO Jing, et al. Wide-Area Instantaneous cm-Level Precise Point Positioning: Method and Service System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1058-1069.

[17] 伍冠滨, 陈俊平, 白天阳, 等. 非差非组合PPP的广域星间单差天顶电离层模型及其验证[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(6): 928-937.
WU Guanbin, CHEN Junping, BAI Tianyang, et al. Wide-Area Between-Satellite Single-Difference VTEC Ionospheric Model and Its Assessment for Undifferenced and Uncombined PPP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(6): 928-937.

[18] LI W, LI Z S, WANG N B, et al. A Satellite-Based Method for Modeling Ionospheric Slant TEC from GNSS Observations: Algorithm and Validation[J]. *GPS Solutions*, 2021, 26(1): 14.

[19] 姚宜斌, 冯鑫滢, 彭文杰, 等. 基于CORS的区域大气增强产品对实时PPP的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(12): 1739-1748.
YAO Yibin, FENG Xinying, PENG Wenjie, et al. Local Atmosphere Augmentation Based on CORS for Real-Time PPP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(12): 1739-1748.

[20] 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.

[21] LI W, SONG S L, ZHOU W L, et al. Investigating the Impacts of Ionospheric Irregularities on Precise Point Positioning over China and Its Mechanism[J]. *Space Weather*, 2022, 20(11): e2022SW003236.