引文格式:郑凯,檀灵敏,刘克中,等.多频GNSS非差非组合PPP多径误差修正及定位性能评估[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(10):1967-1977.DOI:10.13203/j.whugis20230200

Citation: ZHENG Kai, TAN Lingmin, LIU Kezhong, et al. Multi-frequency GNSS Undifferenced and Uncombined PPP with Multipath Error Correction and Positioning Performance Evaluation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(10):1967-1977.DOI:10.13203/j.whugis20230200

多频GNSS非差非组合PPP多径误差修正及定位性能评估

郑 凯[1,2] 檀灵敏[1] 刘克中[1,2] 钱 闯[3]

1 武汉理工大学航运学院,湖北 武汉,430063

2 武汉理工大学国家水运安全工程技术研究中心,湖北 武汉,430063

3 武汉理工大学智能交通系统研究中心,湖北 武汉,430063

摘 要:多径误差是影响精密单点定位(precise point positioning, PPP)收敛时间和定位精度的主要因素之一,处理多频数据需对各频率建立多径误差修正模型,增加了数据处理的复杂度。选用全球分布的12个国际全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)服务观测站的GNSS多频观测数据,以评估非差非组合PPP多径误差修正效果。首先通过恒星日滤波法对部分频率的相位多径建模,然后利用多元线性回归构建频间相位残差相关性模型并获取全频点多径改正数,最后进行定位验证。实验结果表明,任意一频点的相位多径均可由其他频点的相位多径进行拟合,且拟合精度可达91%及以上。多径修正对单系统不同频率组合定位性能的提升效果明显:静态条件下,GPS系统平均收敛时间降低了19.2%;Galileo系统双频、三频、五频收敛时间分别缩短31.2%、42.8%和32.9%;北斗系统双频、三频收敛时间分别缩短16.4%、17.0%至28 min左右,动态同样具有明显提升。三系统组合静态PPP平均收敛时间由15 min缩短至13 min左右,收敛后东、北、天3方向定位精度分别达0.27、0.24、0.80 cm;动态平均收敛时间可由17 min缩短至16 min左右,3方向定位精度分别达0.82、0.68、2.40 cm。因此,研究频间相位多径相关关系、获取全频多径改正数对于提升多频GNSS多径修正效率及定位精度具有一定意义。

关键词:多频GNSS;非差非组合PPP;多路径;多元线性回归;北斗卫星导航系统

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-10-31

DOI:10.13203/j.whugis20230200 **文章编号**:1671-8860(2025)10-1967-11

Multi-frequency GNSS Undifferenced and Uncombined PPP with Multipath Error Correction and Positioning Performance Evaluation

ZHENG Kai[1,2] *TAN Lingmin*[1] *LIU Kezhong*[1,2] *QIAN Chuang*[3]

1 School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

2 National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

3 Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

Abstract: **Objectives**: Multipath effect is one of the main factors that affect the convergence time and positioning accuracy of precise point positioning (PPP). For multi-frequency GNSS undifferenced and uncombined PPP, it is necessary to establish a multipath correction model for each frequency, which increases the complexity of data processing. We evaluate the effectiveness of multipath correction in undifferenced and uncombined PPP using multi-frequency GNSS observation data from 12 International GNSS (global navigation satellite system) Service stations. **Methods**: We extract the raw phase residuals based on GPS/Galileo/BDS (BeiDou satellite navigation system) multi-frequency undifferenced and uncombined PPP, and use multiple linear regression to construct a correlation model of inter-frequency phase residuals. The sidereal filtering is used to establish a multipath model for the phase residuals of some frequencies, combined with

基金项目:国家自然科学基金(42104015);湖北省自然科学基金(2025AFB652);湖北省重点研发计划(2022BID010)。

第一作者:郑凯,博士,副教授,研究方向为GNSS精密定位。kzheng@whut.edu.cn

the residual correlation model to recover the full-frequency multipath correction. **Results**: The results show that the phase residuals of any frequency can be fitted by the phase residuals of other frequency points, with a fitting accuracy of 91% or more. In static conditions, it leads to an average decrease of 19.2% in the GPS convergence time. In contrast, for Galileo systems employing dual-frequency, triple-frequency, and five-frequency PPP positioning, the convergence time is reduced by 31.2%, 42.8%, and 32.9%, respectively. Similarly, for BDS dual-frequency and triple-frequency positioning, the convergence time shortened by 16.4% and 17.0%, stabilizing around 28 min. The kinematic results also showed significant improvement. Additionally, for GPS/Galileo/BDS combination, the average convergence time was shortened from 15 min to about 13 min with multipath correction in static mode, the resulting positioning accuracies in the east, north, and up directions reached 0.27 cm, 0.24 cm, and 0.80 cm, respectively. Under kinematic conditions, the average convergence time of GPS/Galileo/BDS was decreased from 17 min to about 16 min. Furthermore, the positioning accuracies of GPS/Galileo/BDS in the east, north, and up directions reached 0.82 cm, 0.68 cm, and 2.40 cm, respectively. **Conclusions**: Therefore, studying the inter-frequency phase multipath correlation and obtaining a comprehensive multipath correction model is of significant importance for improving the efficiency of multi-frequency GNSS multipath mitigation and positioning accuracy.

Key words: multi-frequency GNSS; undifferenced and uncombined PPP; multipath; multiple linear regression; BeiDou satellite navigation system

精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术具有灵活的定位方式且无须参考站即可在全球范围内实现绝对定位,被广泛应用于地震学、大气监测、智能交通等领域[1]。随着全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)的发展与增强,多频多模PPP技术逐渐成熟,其定位精度和可靠性也在不断提高[2-3]。近年来,对于提升多频多模PPP定位性能的研究主要集中于消除系统性误差及可模型化误差,如卫星端多径误差[4]、对流层延迟误差[5]和电离层延迟误差精细化建模[6-7],对于未模型化误差的研究相对较少。多径误差作为一项主要的未模型化误差,对PPP的定位精度和收敛时间造成不容忽视的影响,许多学者对多径误差的产生机理、影响方式及其特性展开了一系列的研究[8-10]。

多径误差是指反射、直射信号产生干涉使得观测值偏离真值的误差,通常是由信号漫反射和镜面反射引起[11]。为削弱多径影响,当前研究主要从测站环境选址、硬件设计以及数据处理算法3方面展开。其中,基于软件的数据处理算法因其成本较低,近年来备受关注。恒星日滤波(sidereal filtering,SF)最初由文献[12]提出,主要利用多径在时间域上的重复性即当测站周围环境保持不变的情况下多路径效应与卫星轨道可视重复周期相关,利用该特性将目标天坐标序列减去前一天对应时刻的坐标残差序列即可削弱多路径误差;而多径半天球图(multipath hemispherical map,MHM)[13-14]是基于多径的空间重复性,根据卫星高度角及方位角构建误差模型。相较于MHM,SF具有更高的时间分辨率,可提高高频信号的捕捉能力。随着多频GNSS的发展,利用原始观测数据的非差非组合PPP模型逐渐成为GNSS数据处理的热点,不同于无电离层组合观测值消除电离层的一阶项误差,非组合模型利用原始观测数据直接估计电离层延迟,避免了组合观测值噪声放大[15]。然而随着非差非组合多频观测数据的增加,需要对各频率建立多径误差模型,增加了数据处理的复杂度。

已有研究表明,双频多径误差和频率呈现一定的相关性[16],受参数估计过程中误差重分配影响,某一频率观测值残差实际是多个频率残差的综合影响。因此,本文首先利用GPS/伽利略卫星导航系统(Galileo)/北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system,BDS)(GEC)三系统非差非组合PPP提取原始相位残差,之后分析三频、五频PPP相位残差间的相关性,建立频率间残差的数学关系;通过构建部分频率上相位多径改正模型,结合频间多径相关关系,快速获取各个频率上的多径改正模型;最后,实时改正所有频率上多径误差,并对多径改正效果及其对PPP定位性能的影响进行评估。

1　残差提取与多径模型构建

1.1　非差非组合PPP

使用精密产品修正卫星轨道和钟差后,多频GNSS非差非组合PPP模型为[17]:

$$\begin{cases} p_{r,j}^{S}=u_r^S x+\bar{t}_r+T_r^S+\delta_{r,S}+\\ \qquad \gamma_{j,S}\bar{I}_{r,1}^{S}+M_{r,j}^{S}+\xi_{r,j}^{S}\\ l_{r,j}^{S}=u_r^S x+\bar{t}_r+T_r^S+\delta_{r,S}-\\ \qquad \gamma_{j,S}\bar{I}_{r,1}^{S}+\lambda_j^S\bar{N}_{r,j}^{S}+m_{r,j}^{S}+\varepsilon_{r,j}^{S} \end{cases} \tag{1}$$

式中,$p_{r,j}^{S}$和$l_{r,j}^{S}$分别表示伪距与相位观测量减去计算量;下标r和j分别表示接收机和频率;上标S代表GPS(G)、Galileo(E)和BDS(C)系统;u_r^S和x分别表示方向余弦与坐标修正量;$\bar{t}_r$为接收机钟差;T_r^S表示斜对流层延迟;$\delta_{r,S}$是相对于GPS的系统间偏差(inter-system bias,ISB);$\bar{N}_{r,j}^{S}$为吸收未校准相位延迟的浮点模糊度;λ_j^S为对应的波长;电离层放大因子为$\gamma_{j,S}=f_1^2/f_j^2$,各频率上电离层延迟表示为$\bar{I}_{r,j}^{S}=\gamma_{j,S}\bar{I}_{r,1}^{S}$;$M_{r,j}^{S}$和$m_{r,j}^{S}$分别为伪距和相位观测值中的多径误差;$\xi_{r,j}^{S}$和$\varepsilon_{r,j}^{S}$分别为伪距和相位观测噪声。

卫星和接收机的天线相位中心和变化量由国际GNSS服务(International GNSS Service,IGS)天线文件提供;ISB采用白噪声估计;测站坐标静态模式下按常数估计,动态模式下则按白噪声估计;模糊度参数按常数估计;对流层干分量延迟由模型校正[18],湿分量采用随机游走估计;电离层延迟参数按白噪声估计;天线相位缠绕、相对论效应、地球自转和潮汐负荷形变由已有模型进行校正[19]。所有参数被精确估计和建模后,相位残差中仅包含多径误差、观测噪声以及剩余未模型化误差,其中以多径误差为主[16]。因此,伪距和相位多径误差可表示为:

$$\begin{cases} \bar{M}_{r,j}^{S}=p_{r,j}^{S}-u_r^S x-\bar{t}_r+\gamma_{j,S}\bar{I}_{r,1}^{S}-\\ \qquad T_r^S-\lambda_j^S\bar{N}_{r,j}^{S}-\delta_{r,S}-\xi_{r,j}^{S}\\ \bar{m}_{r,j}^{S}=l_{r,j}^{S}-u_r^S x-\bar{t}_r+\gamma_{j,S}\bar{I}_{r,1}^{S}-\\ \qquad T_r^S-\lambda_j^S\bar{N}_{r,j}^{S}-\delta_{r,S}-\varepsilon_{r,j}^{S} \end{cases} \tag{2}$$

1.2　SF

利用SF对各系统不同类型卫星进行建模,该算法关键在于获取卫星准确的轨道重复周期(orbital repeat time,ORT)。利用广播星历提供的轨道参数,可算出理论的卫星轨道周期T[20]:

$$n=\sqrt{GM}/a^{3/2}+\Delta n \tag{3}$$

$$T=\frac{2\pi}{n} \tag{4}$$

式中,Δn为卫星平均角速度n的改正数;a为轨道半长轴;$GM=3.986\,004\,7\times10^{14}\ \mathrm{m^3/s^2}$为万有引力常数与地球总质量的乘积。各星座卫星ORT的计算公式为:

$$\begin{cases} O_{\mathrm{G}}=2T_{\mathrm{G}}\\ O_{\mathrm{E}}=17T_{\mathrm{E}}\\ O_{\mathrm{C_MEO}}=13T_{\mathrm{C_MEO}}\\ O_{\mathrm{C_IGSO}}=2T_{\mathrm{C_IGSO}} \end{cases} \tag{5}$$

式中,O为ORT。

考虑到不同类型卫星ORT与一个标准恒星日之间的时延,在实际多径修正中需以目标时序为准,建模时序进行相应的时序平移。GPS卫星两重复周期对齐需平移约245 s;BDS倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit,IGSO)卫星平移时间约225 s,中高度地球轨道(medium Earth orbit,MEO)卫星约1 703 s;对于Galileo,时序约平移2 427 s。

1.3　多元回归分析(multiple regression analysis,MLR)

MLR[21]是多元统计分析中的一个重要方法,在探究多个变量之间的关系时,先假设其中一个变量为因变量,然后使用多元线性回归模型来研究该因变量与其他变量之间的关系,此方法在探索和解释多个变量之间的关系方面具有广泛的应用。本文利用MLR对三频、五频非差非组合PPP相位残差进行分析,MLR模型表示为:

$$y_i^S=b_0^S+b_1^S x_{1i}^S+b_2^S x_{2i}^S+\cdots+b_m^S x_{mi}^S \tag{6}$$

$$\boldsymbol{b}=\begin{bmatrix} b_0\\ b_1\\ \vdots\\ b_m \end{bmatrix},\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m}\\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix},\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix} y_1\\ y_2\\ \vdots\\ y_n \end{bmatrix} \tag{7}$$

设自变量组$\boldsymbol{X}$为各系统除目标频率外第1~m频率上第i历元的相位多径误差,其中$m=j-1(j\geqslant2,i=1,2,\cdots,n)$。因变量$y_i^S$即为目标频率上的相位多径误差,利用最小二乘算法估计模型系数,求解目标频率多径估计值与实际观测值之间的误差平方和最小时的模型系数值:

$$\hat{b}=\left(\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}\right)^{-1}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y} \tag{8}$$

$$\min Q(b_0^S,b_1^S,b_2^S,\cdots,b_m^S)=\sum_{i=1}^{n}[\,y_i^S-(b_0^S+b_1^S x_{1i}^S+b_2^S x_{2i}^S+\cdots+b_j^S x_{mi}^S)\,]^2 \tag{9}$$

通过估计数据与原始数据均值之差的平方和与原始数据和均值之差的平方和的比值判断所得模型的准确度与适配度,即频间相关模型的确定系数R_{square}:

$$R_{\text{square}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i^S-\bar{y}^S)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i^S-\bar{y}^S)^2} \tag{10}$$

式中,$\hat{y}_i^S$为各系统目标频率上第i历元的相位残差估计值;$\bar{y}^S$为原始相位残差均值。确定系数的取值范围为[0,1],值越接近1,表明方程的变量对y的解释能力越强,模型对数据的拟合程度越好。作为评价指标的相位残差降低百分比D可表示为:

$$D=[(M_{\text{uncor}}-M_{\text{cor}})/M_{\text{uncor}}]\times 100\% \tag{11}$$

式中,M_{uncor}表示原始相位残差均方根(root mean square, RMS);M_{cor}表示多径修正后的相位残差值。

2 多径误差修正实验与分析

选取2021年年积日(day of year, DOY)88—118、AREG等12个IGS测站30 s采样率的观测数据进行实验,测站分布如图1所示。各测站均可接收GPS L1(1 575.42 MHz)、L2(1 227.60 MHz)双频信号,Galileo E1(1 575.42 MHz)、E5a(1 176.45 MHz)、E5b(1 207.14 MHz)、E5(1 278.75 MHz)、E6(1 278.75 MHz)五频信号以及BDS B1I(1 561.10 MHz)、B2I(1 207.14 MHz)、B3I(1 268.52 MHz)3个频段的信号。精密轨道和钟差产品由德国地学研究中心(GeoForschungsZentrum,GFZ)提供。

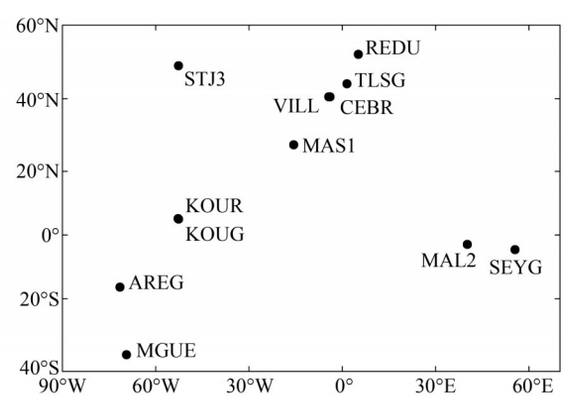


图1 12个IGS测站分布图

Fig. 1 Distribution of 12 IGS Stations

目前GFZ提供的精密钟差产品由特定两组频率的无电离层组合观测值解算得到,如GPS为L1/L2频率,Galileo为E1/E5a频率,BDS为B1I/ B3I频率。对于GPS IIF卫星,L1/L2和L1/L5之间的频间钟偏差(inter-frequency clock bias,IFCB)可达20 cm,考虑到GPS的IFCB对相位多径提取影响较大,本文仅采用L1/L2双频数据[22]。而Galileo、BDS卫星IFCB影响较小,可以忽略[23]。利用SF从原始相位残差中提取多径改正数,本文采用连续31 d的观测数据,对于GPS、BDS、Galileo三系统卫星均采用3个周期的数据用于建模,改正第4个周期,以验证多径修正的准确性。为分析不同频率残差间的关系,共设计了6组实验方案,如表1所示。

表1 GNSS非差非组合PPP不同频率组合

Table 1 Different Frequency Combinations for Undifferenced and Uncombined PPP

系统	频率组合	方案
GPS	L1/L2	1
Galileo	E1/E5a	2
	E1/E5a/E6	3
	E1/E5a/E5b/E5/E6	4
BDS	B1I/ B3I	5
	B1I/ B3I / B2I	6

2.1 三频相位残差相关性分析

文献[24]研究表明,不同系统相同类型卫星的PPP相位残差存在显著的线性关系,且双频相位残差相关系数对应所在频率平方之比。以2021年DOY 118测站MAS1为例,图2为多系统GEC双频(L1/L2、E1/E5a、B1I/ B3I)非差非组合PPP原始相位残差,同一系统内所有可视卫星的相位残差均显示出显著的负相关性。图3为同天同测站EC三频(E1/E5a/E6、B1I/B3I/B2I)非差非组合PPP原始相位残差。E1/E6、B1I/B2I残差相关性较弱,E5a/E6皮尔逊相关系数绝对值低于0.2,B2I/B3I皮尔逊相关系数绝对值低于0.3。对比图2双频结果,E1/E5a与B1I/B3I的相关性也有所减弱。这是由于参数估计过程中误差进行了重新分配,三频非差非组合PPP相位残差不再符合双频时的线性关系。为了解释该现象,本文进一步研究了三频相位残差之间的联系,特别是新增的频率对原有的双频组合所产生的影响。

由式(6),利用各系统第二频率和第三频率相位残差估计第一频率的相位残差可表示为:

$$\bar{R}_1^S=b_0^S+b_1^S R_2^S+b_2^S R_3^S \tag{12}$$

式中,$\bar{R}_x^S$表示第x频率上的相位残差估计值;R_x^S表示第x频率上的原始相位残差;b_0^S、b_1^S、b_2^S分别为模型系数。

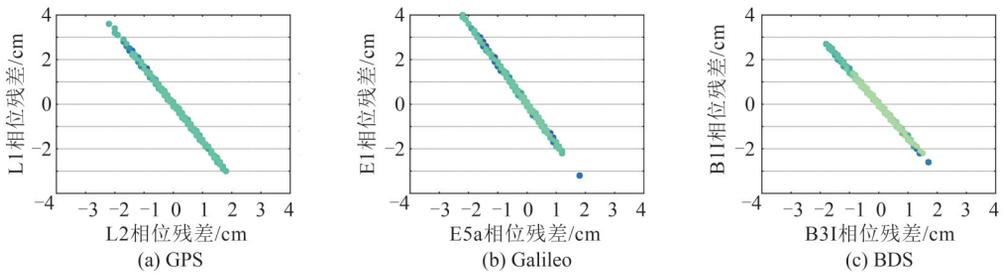


图 2　GPS/Galileo/BDS 双频 PPP 原始相位残差

Fig. 2　Original Phase Residuals of Dual-Frequency PPP for GPS/Galileo/BDS

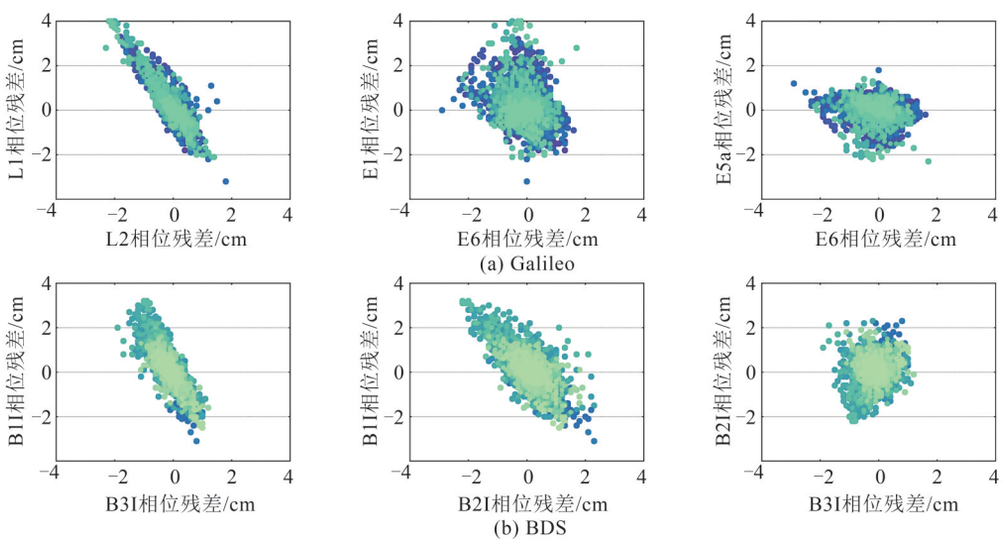


图 3　Galileo/BDS 三频 PPP 原始相位残差

Fig. 3　Original Phase Residuals of Triple-Frequency PPP for Galileo/BDS

表 2 为三频 PPP 相位残差解算得到的 GEC 各系统所有可视卫星三频多径相关模型系数及对应频率平方值。第一频率的相位残差主要由第二频率残差拟合得到,第三频率上相位残差的贡献较小。如 Galileo 系统,E1 与 E5a 频率残差(拟合系数为−1.78)相关性强于 E6(拟合系数为−0.76)。同样,对于 BDS,B1I 与 B3I 频率(拟合系数为−1.49)残差相关性强于 B2I(拟合系数为−0.81)。这也解释了三频非差非组合 PPP 解算的 E1/E5a 与 B1I/B3I 相位残差存在一定程度上的线性相关趋势的原因。同一系统内,可视卫星目标频率估计模型的 R_{square} 均值接近于 1,说明了三频 PPP 多径残差相关模型的可靠性。

图 4、图 5 均为三频 PPP 残差估计值及修正

表 2　GPS/Galileo/BDS 三频 PPP 相位残差相关系数及频率平方比

Table 2　Correlation Coefficient and Frequency Squared Ratio of Triple-Frequency PPP Phase Residuals for GPS/Galileo/BDS

系统	系数			频率平方比		R_{square}
	b_0	b_1	b_2	$-f_1^2/f_2^2$	$-f_1^2/(f_2^2+f_3^2)$	
GPS	8.59×10^{-6}	−1.62		−1.65		
Galileo	2.24×10^{-4}	−1.78	−0.76	−1.79	−0.82	0.96
BDS	3.15×10^{-6}	−1.49	−0.81	−1.51	−0.79	0.98

的剩余残差(为避免混叠,图中数据均作了纵向平移)。图 5 中 E04 卫星 E1 频率上原始相位残差数值在−0.3~0.7 cm 之间波动,C21 卫星 B1I 频率上原始相位残差数值在−0.5~0.4 cm 之间波动。利用第二、三频率相位残差恢复第一频率残差,剩余误差均稳定在±0.15 cm 内。由此可得该相关性模型可有效恢复目标频率上的残差,有利于提高后续多频多径建模精度。

2.2　五频相位残差相关性分析

五频 PPP 各系统第一频率上的相位多径可

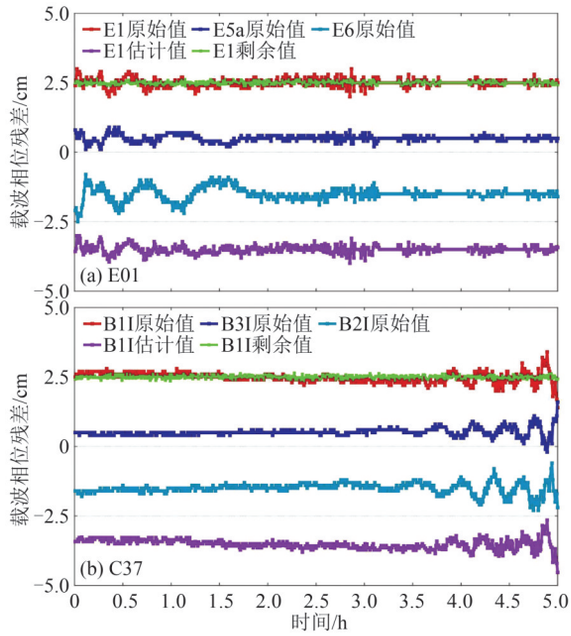


图4 2021年DOY 112测站AREG三频PPP相位残差

Fig. 4 Triple-Frequency PPP Phase Residuals for Station AREG on DOY 112, 2021

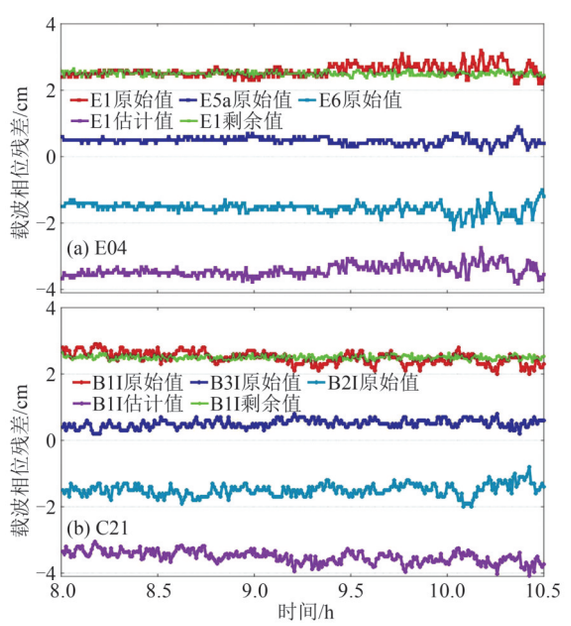


图5 2021年DOY 118测站MAS1三频PPP相位残差

Fig. 5 Triple-Frequency PPP Phase Residuals for Station MAS1 on DOY 118, 2021

表示为:

$$\bar{R}_1^S = b_0^S + b_1^S R_2^S + b_2^S R_3^S + b_3^S R_4^S + b_4^S R_5^S \quad (13)$$

式中,$\bar{R}_1^S$为Galileo系统E1频率上的相位残差估计值;b_0^S表示模型常数项系数;b_1^S、b_2^S、b_3^S、b_4^S分别表示与E5a、E6、E5b、E5频率相位残差对应的系数,具体值如表3所示。

由于五频非差非组合PPP获得的残差受频率间误差影响较为复杂,因此各频点上相位残差相关系数与频率的具体对应关系还有待进一步研究。图6给出了2021年DOY 118测站MAS1单Galileo系统五频PPP原始相位残差与修正后的剩余残差。E1频率上估计的相位残差与原始残差序列基本一致,相减后剩余残差基本稳定在±0.2 cm内,表明该模型可有效恢复Galileo系统目标频率上的残差。

表3 五频PPP相位残差相关系数

Table 3 Correlation Coefficient of Phase Residuals for Five-Frequency PPP

系统	频率	系数	R_{square}
Galileo		$b_0=2.24\times10^{-4}$	0.95
	E5a	$b_1=-1.70$	
	E6	$b_2=-0.68$	
	E5b	$b_3=-0.79$	
	E5	$b_4=-0.82$	

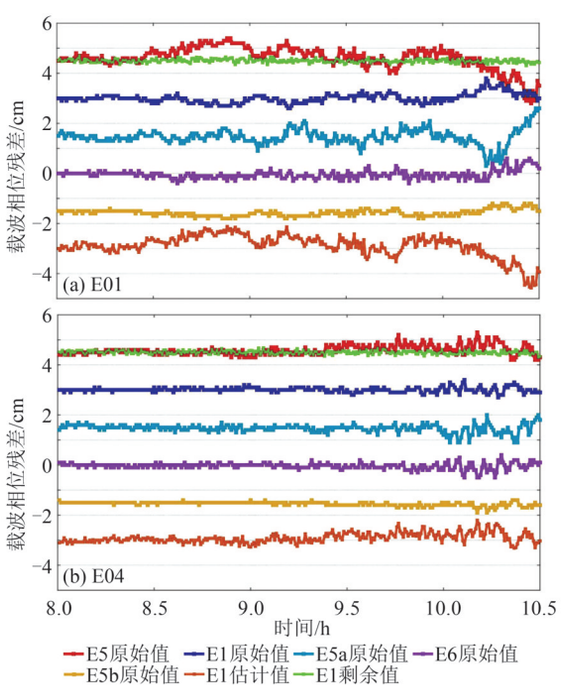


图6 2021年DOY 118测站MAS1五频PPP相位残差

Fig. 6 Five-Frequency PPP Phase Residuals for Station MAS1 on DOY 118, 2021

此外,分别统计了2021年DOY 118各测站双频、三频和五频PPP目标频率相位残差修正后RMS降低百分比的均值,如图7所示,其中G、E、C后数字代表各系统参与PPP解算的频率数。不同测站、不同系统相位残差RMS降低百分比均在85%以上,说明双频、三频、五频相关模型具有良好的相位残差恢复效果。GPS双频L1/L2(G2)相位残差RMS降低百分比在所有测站的均值为92%,Galileo双频E1/E5a(E2)、三频E1/E5a/E6(E3)、五频E1/E5a/E5b/E5/E6(E5)

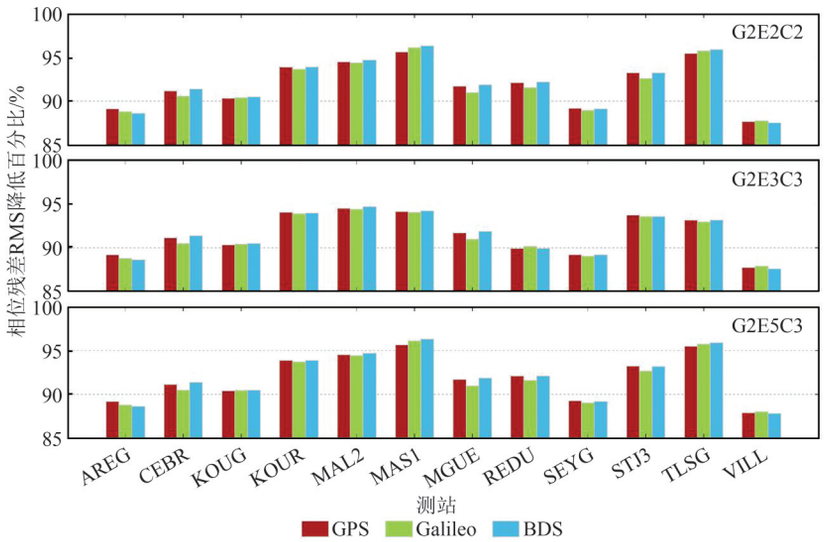


图 7　相位残差 RMS 降低百分比

Fig. 7　RMS Reduction Percentage of Phase Residuals

均值分别为 92%、91%、92%,BDS 双频 B1I/B3I(C2)、三频 B1I/B3I/B2I(C3)均值约为 92%。对于同天不同测站,可视卫星 RMS 降低百分比显示出一定的差异,这主要是因为不同测站数据质量有所差异,同时多径会受周围环境变化的影响,使得各频点模型准确度不同。但对同一测站,相关模型恢复目标频率相位残差的效果无系统间差异。此外,本文使用非差非组合 PPP 方法得到的某频率残差也受到其他频率误差的影响,这意味着提取的某频率的多径误差也会受到其他频率多径误差的干扰。通过建立频率间多径误差的相关性,可以降低数据处理的复杂度。然而,不同频率之间的多径误差并不简单地呈线性关系,其变化特性非常复杂。因此,本文建立的相关关系仅适用于非差非组合 PPP 模型。

2.3　定位验证

本文从收敛时间和定位精度两方面评估 PPP 定位性能,其中收敛时间定义为东(east, E)、北(north, N)、天(up,U)3 方向定位精度达到 10 cm 且保持 20 个历元[25]。表 4 统计了不同定位组合静/动态 PPP 在 12 个测站的平均收敛时间。相比 Galileo 和 BDS,实验测站 GPS 可视卫星数量多且分布较好,因此单 GPS 系统收敛相对较快,且对于单 Galileo、BDS 系统而言,多径修正缩短收敛时间的效果更为显著。静态条件下,多径修正后 G2 收敛时间从 26.5 min 缩短至 21.4 min,缩短了 19.2%;E2、E3、E5 在多径修正后定位收敛时间从 42 min 左右分别缩短至 29.1、24.2、28.4 min,分别缩短了 31.2%、42.8%、32.9%;多径修正后 C2、C3 收敛时间分别缩短了 16.4% 和 17.0%,至 28 min 左右。多径修正前,单系统定位收敛时间相比于双系统和三系统分别长 22.1、27.5 min;多径修正后,单系统收敛时间大幅降低,E2/E3/E5 相比 G2E2/G2E3/G2E5 收敛时间分别长 13.2、8.4 和 13.4 min,E2/E3/E5 相比 G2E2C2/G2E3C3/G2E5C3 收敛时间分别长 16.4、10.5 和 15.8 min。双系统组合 G2E2/G2E3/G2E5 收敛时间在 15 min 左右,接近三系统多径修正前的定位水平。三系统不同频率组合在多径修正前后的定位性能均优于单系统、双系统,但多径修正对单系统、双系统不同频率组合定位性能具有更明显的提升作用。如 GEC 不同频率组合静态收敛时间缩短 2 min 左右。

动态 PPP 需要更长时间收敛,尤其对于单系统,多径修正前 E2、E3、E5 需要 80.6 min 才能实现收敛,多径修正后各组合定位收敛时间平均缩短 18.3 min,单 BDS 双频、三频收敛时间从 62.3 min 分别缩短至 49.8、48.0 min,缩短了 20.1%、23.0%。三系统不同频率组合在多径修正后动态收敛时间由 17 min 左右缩短至 16 min 左右。

表 5 统计了静/动态条件下不同定位组合 PPP 多径修正后的 3 方向定位误差。静态条件下,GPS 系统在多径修正后的定位精度相对于 Galileo、BDS 提升更显著,尤其在 U 方向,多径修正后误差平均降低 3.4 mm。这主要是由于 GPS 卫星轨道重复周期短,测站环境变化较小,多径建模精度高。此外,还可能受其他未模型化误差的影响,Galileo 和 BDS 多径模型精度也降低了[16]。由表 5 可知,多径修正前后 N 方向精度均优于 E、U 方向,这主要是因为 PPP 模糊度未固定

表4 不同定位组合静/动态PPP平均收敛时间统计

Table 4 Statistics of Averaged Convergence Time for Static/Kinematic PPP with Different Positioning Combinations

定位组合	静态收敛时间			动态收敛时间		
	原始/min	修正后/min	降低百分比/%	原始/min	修正后/min	降低百分比/%
G2	26.5	21.4	19.2	52.3	46.7	10.7
E2	42.3	29.1	31.2	80.6	65.9	18.2
E3	42.3	24.2	42.8	80.6	63.7	21.0
E5	42.3	28.4	32.9	80.6	58.3	27.7
C2	33.5	28.0	16.4	62.3	49.8	20.1
C3	33.5	27.8	17.0	62.3	48.0	23.0
G2E2	20.2	15.9	21.3	27.0	18.5	31.5
G2E3	20.2	15.8	21.8	27.0	18.4	31.9
G2E5	20.2	15.0	25.7	27.0	21.0	22.2
G2C2	19.3	14.9	22.8	18.5	16.8	9.2
G2C3	19.3	14.5	24.9	18.5	17.9	3.2
G2E2C2	14.8	12.7	14.2	16.8	15.8	6.0
G2E3C3	14.8	13.7	7.4	16.8	16.5	1.8
G2E5C3	14.8	12.6	14.9	16.8	15.4	8.3

为整数,仍采用浮点解[26]。此外,多径修正对单、双系统定位精度提升较大,静态条件下,单系统G2、E2、E3、E5、C2、C3 3方向平均定位精度分别提升12.9%、16.9%、14.6%、16.2%、14.1%、17.0%;双系统组合G2E2、G2E3、G2E5、G2C2、G2C3 3方向平均定位精度提升了16.0%、16.8%、35.0%、33.0%、20.8%;三系统组合G2E2C2、G2E3C3、G2E5C3在E、N、U 3方向定位精度分别由0.27、0.29、1.01 cm提升至0.27、0.24、约0.80 cm,变化相对较小。动态条件下,多径修正对单系统、双系统PPP同样具有显著的提升效果;三系统组合在E、N、U方向平均降低约1.00、1.00、4.00 mm的误差。多径修正对三系统组合静、动态定位性能提升效果相对较小,主要是因为多频多模组合观测冗余增多,使得卫星空间几何结构强度增强,参数不易受未模型化误差影响,多频多系统组合PPP收敛后,精度本身可达较高水平。相较而言,单系统定位模型结构较弱,参数容易受未模型化误差影响,因此多径修正对单系统定位性能提升较多系统明显。

表5 12测站静/动态PPP平均定位误差/cm

Table 5 Averaged Positioning Errors of Static/Kinematic PPP for 12 Stations/cm

系统/频率组合	静态定位误差						动态定位误差					
	原始数据			多径修正			原始数据			多径修正		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
G2	0.52	0.30	1.17	0.57	0.28	0.83	1.62	1.12	3.77	1.45	1.08	3.10
E2	0.48	0.35	1.54	0.48	0.31	1.32	2.10	1.46	4.36	1.82	1.41	4.34
E3	0.48	0.35	1.54	0.48	0.30	1.25	2.10	1.46	4.36	1.81	1.38	4.38
E5	0.48	0.35	1.54	0.49	0.33	1.28	2.10	1.46	4.36	1.87	1.37	4.42
C2	0.51	0.32	1.51	0.47	0.31	1.24	2.44	1.87	5.79	2.13	1.5	5.16
C3	0.51	0.32	1.51	0.47	0.30	1.28	2.44	1.87	5.79	2.10	1.48	5.04
G2E2	0.27	0.30	1.08	0.33	0.26	0.86	1.11	0.79	2.90	0.88	0.77	2.38
G2E3	0.27	0.30	1.08	0.28	0.26	0.89	1.11	0.79	2.90	0.94	0.75	2.50
G2E5	0.27	0.30	1.08	0.30	0.27	0.87	1.11	0.79	2.90	0.93	0.73	2.46
G2C2	0.28	0.28	1.16	0.27	0.24	0.71	1.03	0.88	3.22	0.97	0.83	2.62
G2C3	0.28	0.28	1.16	0.28	0.25	0.73	1.03	0.88	3.22	0.93	0.82	2.51
G2E2C2	0.27	0.29	1.01	0.27	0.24	0.78	0.93	0.75	2.78	0.83	0.71	2.42
G2E3C3	0.27	0.29	1.01	0.25	0.24	0.80	0.93	0.75	2.78	0.83	0.69	2.38
G2E5C3	0.27	0.29	1.01	0.27	0.24	0.80	0.93	0.75	2.78	0.82	0.68	2.40

以2021年DOY 118测站MGUE为例,图8、9分别给出了不同组合静/动态的PPP定位误差,其中黄、绿、蓝色线条分别代表多径修正后E、N、U 3个方向上的定位误差序列,红色线条对应原

始误差序列。由图8可知,多径修正后静态PPP在3方向定位精度均具有明显提升,尤其在U方向,收敛前单系统同一时刻多径修正前后误差最高降低40 cm,双系统和3系统同一时刻误差最高降低20 cm。3系统组合定位误差相对较小且更稳定,可在短时间内达到较高的定位精度。多径修正后,G2、E5、C3在10 min时E、N、U方向误差分别达3.9、2.7、8.0 cm,定位至20 min时3方向定位误差即可收敛至0.7、0.2、0.9 cm。然而,在单系统或双系统PPP中,要获得毫米级的精度,G2E2、G2E3、G2E5至少需要40 min,而单独使用Galileo系统则需要60 min以上。

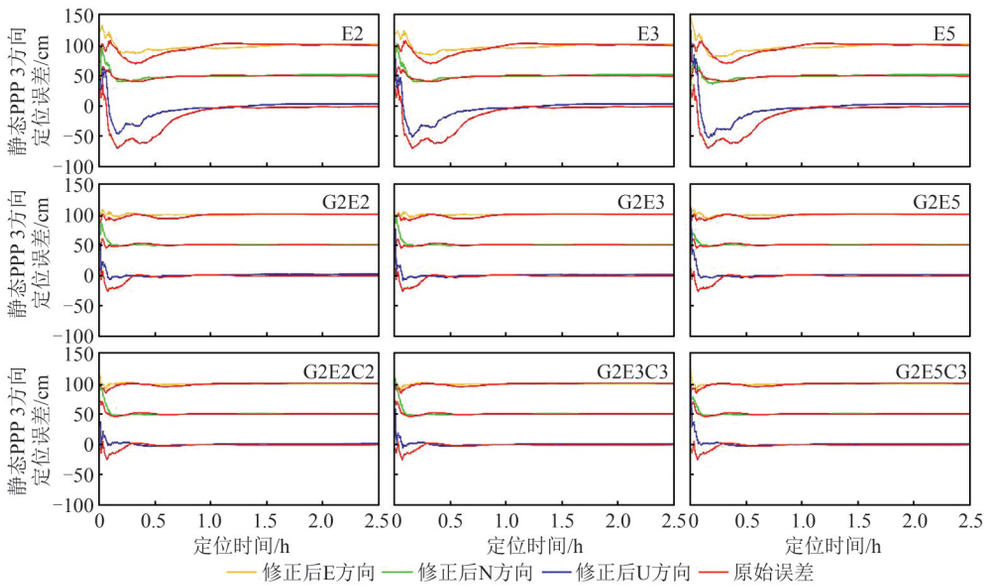


图8　测站MGUE不同组合静态PPP多径修正前后E、N、U 3方向定位误差

Fig. 8　Static PPP Errors in the E, N, and U Directions for Different Combinations Before and After Multipath Correction at Station MGUE

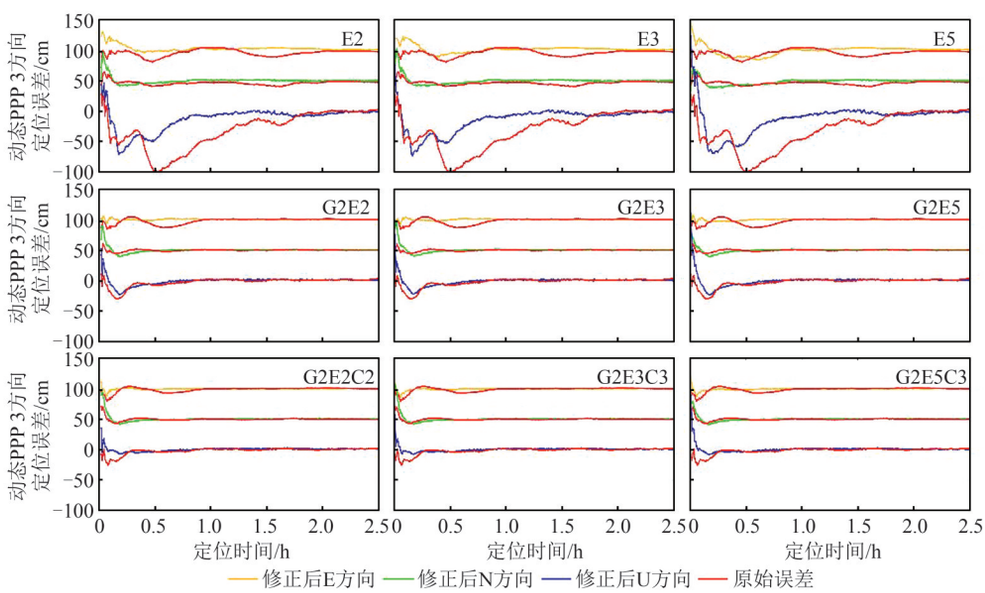


图9　测站MGUE不同组合动态PPP多径修正前后E、N、U 3方向定位误差

Fig. 9　Dynamic PPP Errors in the E, N, and U Directions for Different Combinations Before and After Multipath Correction at Station MGUE

3　结　语

本文采用IGS 12个测站的多频多模观测数据,基于非差非组合PPP提取的原始相位残差,探究了GEC不同频率上相位残差相关关系,并结合SF法构建了多径误差模型,评估了静/动态条件下不同方案多径修正前后PPP定位收敛时间与定位精度,所得结论包括:

1)GEC双频、三频、五频非差非组合PPP任一频率上多径残差可由其他频率残差拟合得到;由相关关系解算并修正原始相位残差,不同系统相位残差降低百分比可达91%以上。

2)多径修正对单系统不同频率组合定位性能提升效果明显。静态条件下,GPS双频PPP平均收敛时间为21.4 min,降低了19.2%;Galileo双频、三频、五频PPP定位收敛时间分别缩短31.2%、42.8%、32.9%,分别为29.1、24.2、28.4 min;BDS双频、三频定位收敛时间分别缩短16.4%、17.0%,至28 min左右。动态条件下,BDS双频、三频定位收敛时间从62.3 min分别缩短至49.8、48.0 min,分别缩短了20.1%、23.0%。

3)三系统在多径修正前后的定位性能均优于单、双系统,但多径修正对单、双系统组合的定位性能具有更明显的提升作用。以静态为例,单系统收敛时间降低水平在16.4%~42.8%,不同频率组合定位均可在30 min内达到收敛,收敛后定位精度提高12.9%~17.0%,E、N、U各方向精度分别优于0.57、0.33、1.32 cm;双系统收敛时间降低水平在21.3%~25.7%,由原始的20 min降低至15 min左右,收敛后定位精度提高16.0%~35.0%,E、N、U 3方向精度分别优于0.33、0.27、0.89 cm;三系统组合平均收敛时间由15 min缩短至13 min左右,收敛后E、N、U 3方向定位精度分别提升至0.27、0.24、0.80 cm。

本文方法也具有一定的局限性。该方法需要较长时间的历史数据用于多径建模,而在实际场景中多径误差可能会随着时间和环境的变化而发生变化,从而导致相位和伪距残差中非周期性误差增加,降低多径修正模型的可靠性。此外,在使用最小二乘回归方法探索变量之间关系时受离群值影响较大,从而降低参数估计的准确度。未来将开展对多径改正数不确定度的评估以及完善多径建模中的数据质量控制方法。

致谢:感谢IGS提供观测数据(ftp://igs.ign.fr/pub/igs/data/)以及GFZ提供的精确产品(ftp://ftp.gfz-potsdam.de/GNSS/products/mgex/)。

参 考 文 献

[1] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B3): 5005-5017.

[2] 闫忠宝, 张小红. GNSS非组合PPP部分模糊度固定方法与结果分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(6): 979-989.
YAN Zhongbao, ZHANG Xiaohong. Partial Ambiguity Resolution Method and Results Analysis for GNSS Uncombined PPP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 979-989.

[3] CAI C S, GAO Y, PAN L, et al. Precise Point Positioning with Quad-Constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(1): 133-143.

[4] WANNINGER L, BEER S. BeiDou Satellite-Induced Code Pseudorange Variations: Diagnosis and Therapy[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(4): 639-648.

[5] LU C X, ZUS F, GE M R, et al. Tropospheric Delay Parameters from Numerical Weather Models for Multi-GNSS Precise Positioning[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(12): 5965-5973.

[6] BANVILLE S, COLLINS P, ZHANG W, et al. Global and Regional Ionospheric Corrections for Faster PPP Convergence[J]. *Navigation*, 2014, 61(2): 115-124.

[7] GU S F, GAN C K, HE C P, et al. Quasi-4-Dimension Ionospheric Modeling and Its Application in PPP[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 24.

[8] SEEPERSAD G, BISNATH S. Reduction of PPP Convergence Period Through Pseudorange Multipath and Noise Mitigation[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(3): 369-379.

[9] ZHANG Z T. Code and Phase Multipath Mitigation by Using the Observation-Domain Parameterization and Its Application in Five-Frequency GNSS Ambiguity Resolution[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(4): 144.

[10] 胡超, 王潜心, 郭忠臣, 等. 一种基于GNSS全系统全频点观测的多路径修正及定位模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(7): 1291-1303.
HU Chao, WANG Qianxin, GUO Zhongchen, et al. A Multi-path Correction and Positioning Model Based on GNSS System-Wide Full Frequency Observation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(7): 1291-1303.

[11] Braasch S. Multipath Effects, in Global Positioning System Theory and Applications[J]. *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 1996, 164: 547-568.

[12] GENRICH J F, BOCK Y. Rapid Resolution of Crustal Motion at Short Ranges with the Global Positioning System[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1992, 97(B3): 3261-3269.

[13] DONG D, WANG M, CHEN W, et al. Mitigation of

Multipath Effect in GNSS Short Baseline Positioning by the Multipath Hemispherical Map[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(3): 255-262.

[14] 邹璇, 付睿男, 王亚伟, 等. 测站处GNSS多路径误差效应反演及其应用研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(9): 1416-1421.
ZOU Xuan, FU Ruinan, WANG Yawei, et al. Inversion of GNSS Multipath Effects Around the Stations and Its Applications[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(9): 1416-1421.

[15] 杜祯强, 柴洪洲, 潘宗鹏, 等. 针对消电离层组合FCB的非组合PPP部分模糊度固定方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(6): 913-919.
DU Zhenqiang, CHAI Hongzhou, PAN Zongpeng, et al. Partial Ambiguity Resolution Method for Uncombined PPP Using Ionosphere-Free Combined FCB[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(6): 913-919.

[16] ZHENG K, ZHANG X H, LI P, et al. Multipath Extraction and Mitigation for High-Rate Multi-GNSS Precise Point Positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(10): 2037-2051.

[17] 章繁, 柴洪洲, 王敏, 等. 组合GPS/GLONASS三频观测值的非差非组合PPP模糊度快速固定[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1900-1910.
ZHANG Fan, CHAI Hongzhou, WANG Min, et al. Undifferenced and Uncombined PPP Ambiguity Resolution Combined with GPS/GLONASS Triple-Frequency Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(10): 1900-1910.

[18] BOEHM 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): 2005GL025546.

[19] SCHMID R, DACH R, COLLILIEUX X, et al. Absolute IGS Antenna Phase Center Model Igs08.atx: Status and Potential Improvements[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(4): 343-364.

[20] AGNEW D C, LARSON K M. Finding the Repeat Times of the GPS Constellation[J]. *GPS Solutions*, 2007, 11(1): 71-76.

[21] MAULUD D, ABDULAZEEZ A M. A Review on Linear Regression Comprehensive in Machine Learning[J]. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 2020, 1(2): 140-147.

[22] TEGEDOR J, ØVSTEDAL O. Triple Carrier Precise Point Positioning (PPP) Using GPS L5[J]. *Survey Review*, 2014, 46(337): 288-297.

[23] CHEN Y B, MI J Z, GU S Z, et al. GPS, BDS-3, and Galileo Inter-Frequency Clock Bias Deviation Time-Varying Characteristics and Positioning Performance Analysis[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(16): 3991.

[24] ZHENG K, ZHANG X H, LI X X, et al. Mitigation of Unmodeled Error to Improve the Accuracy of Multi-GNSS PPP for Crustal Deformation Monitoring[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(19): 2232.

[25] SU K, JIN S G. Analytical Performance and Validations of the Galileo Five-Frequency Precise Point Positioning Models[J]. *Measurement*, 2021, 172: 108890.

[26] BLEWITT G. Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2000 km[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B8): 10187-10203.