引文格式: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.DOI:10.13203/j.whugis20230106

Citation:HU Chao,WANG Qianxin,GUO Zhongchen,et al.A GNSS System-Wide and Frequency-Wide Integrated Multipath Mitigation and Positioning Model[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(7):1291-1303.DOI:10.13203/j.whugis20230106

一种基于GNSS全系统全频点观测的多路径修正及定位模型

胡 超[1,2] 王潜心[3] 郭忠臣[4] 何义磊[5]

1 安徽理工大学空间信息与测绘工程学院,安徽 淮南,232001

2 空间基准全国重点实验室,陕西 西安,710054

3 中国矿业大学环境与测绘学院,江苏 徐州,221116

4 宿州学院环境与测绘工程学院,安徽 宿州,234000

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:多频多模全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)技术为高性能位置服务提供重要支撑,然而当前定位模型处理中并未有效顾及GNSS全星座全频点观测信息。针对传统GNSS参数估计模型中采用固定组合而忽略了多频观测信息的问题,提出了一种基于GNSS全系统全频点观测的多路径误差修正及定位模型。首先,在观测数据预处理中提取伪距多路径误差多频组合量,克服观测噪声与电离层误差影响并实现伪距多路径误差快速消除;其次,以GNSS全系统全频点观测数据为基础,建立各系统内多频无电离层组合观测方程,实现用户端多频观测信息的充分建模处理;最后,基于GNSS多系统观测数据,构建全系统全频点组合定位数学模型。GNSS静态与动态观测数据实验结果表明:GNSS多频观测信息可实现伪距多路径误差的快速处理,尤其是在动态条件下,基于GNSS全系统全频点观测的伪距多路径误差消除策略具有显著优势;在GNSS多频联合定位模型中,多频最优组合策略的动态定位精度较传统北斗三号卫星导航系统双频东、北、天方向分别提升了81.3%、16.7%与79.0%,且收敛时间显著缩短。

关键词:多频观测数据;GNSS全系统全频点;定位模型;伪距多路径误差;无电离层组合

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-06-25

DOI:10.13203/j.whugis20230106 **文章编号**:1671-8860(2025)07-1291-13

A GNSS System-Wide and Frequency-Wide Integrated Multipath Mitigation and Positioning Model

HU Chao[1,2] *WANG Qianxin*[3] *GUO Zhongchen*[4] *HE Yilei*[5]

1 School of Spatial Information and Geomatics Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

2 State Key Laboratory of Spatial Datum, Xi'an 710054, China

3 School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

4 School of Environment and Surveying Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, China

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

Abstract: **Objectives**: It is suggested that the multi-frequency global navigation satellite system (GNSS) technology powerfully accelerate the development of high-performance location services. However, the information of multi-frequency and all-system GNSS observations is not fully used in the processing of positioning parameters. Due to that the fixed combination model used in the traditional GNSS precise point positioning (PPP) solution, the multi-frequency observations are ignored in the parameters estimation. A GNSS system-wide and frequency-wide integrated multipath error mitigation and positioning model is

基金项目:国家自然科学基金(42404015);国家重点研发计划(2020YFA0713502);中国铁路设计集团有限公司企业课题(2023A0240108);广西科技基地和人才专项(桂科AD25069103)。

第一作者:胡超,博士,副教授,主要从事卫星大地测量研究。chaohu2014gnss@163.com

通信作者:王潜心,博士,教授。wqx@cumt.edu.cn

used to improve the PPP performances. **Methods:** First, a code multipath error estimation model is designed by the combination of the multi-frequency observations in the stage of observations preprocessing, where the impacts of observation noise and ionospheric error are eliminated. Second, the multi-frequency ionosphere-free combination is constructed in each system based on the GNSS observations of whole systems and all frequencies to fully model the multi-frequency observations of the users received. Third, integrated GNSS multi-system observations, the mathematical model of the whole systems and frequencies combined positioning solution is constructed. **Results:** According to the experiments of GNSS static and kinematics observations, it is indicated that GNSS multi-frequency observations can quickly mitigate the code multipath error, especially in the kinematics conditions, where the advantages of multi-frequency observations are significantly presented. In the kinematics positioning solutions, compared with traditional BeiDou-3 navigation satellite system dual-frequency kinematics PPP, the east, north and up directions can be improved with 81.3%, 16.7% and 79.0%, respectively, by the GNSS multi-frequency combined strategy. Moreover, the convergence time is significantly shortened. **Conclusions:** Therefore, it is meaningful to use the proposed multi-GNSS and multi-frequency PPP solution, which can promote the improvement of GNSS location services.

Key words: multi-frequency observations; system-wide and frequency-wide GNSS; positioning model; code multipath error; ionosphere-free combination

全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)凭借其全天候、高精度定位、导航与授时(positioning, navigation and timing, PNT)服务能力,正被深度融入"新基建"领域[1-2]。为提升GNSS服务性能,各主要导航系统从卫星几何结构、星座构型、信号体制与增强信息等角度进行了全面更新[3-6]。例如,北斗三号全球卫星导航系统(BeiDou-3 satellite navigation system, BDS-3)实现了5频(B1I、B3I、B1C、B2a、B2b)同步服务,GPS提供L1C/A、L1C、L2C、L5信号服务,新一代格洛纳斯(GLONASS)-K2卫星实现了3个频点码分多址民用信号播发功能,伽利略(Galileo)系统在5频(E1、E5a、E5b、E5ab、E6)服务的基础上不断提升信号精度[7-9]。显然,在GNSS全星座与全频点协同服务模式下,增加了参数处理中的多余观测数,可有效提升用户端偏差参数建模、模糊度固定与位置服务等性能[10-12]。然而,受GNSS参数估计数学模型限制,全系统多频观测信息尚未实现充分挖掘与自适应融入,尤其是在受复杂环境影响的应用中,多频观测数据对稳健可靠的PNT服务尤为重要[13]。

为有效利用GNSS多频观测信息,相关研究主要集中于数据预处理与定位模型增强两部分。例如,周跳探测[14]、多频组合定位[15]、多路径误差与伪距偏差提取[16-17]等,其本质是通过多频观测数据间线性组合实现额外频率信息的引入,补偿参数处理数学模型[8,18-19]。针对不同应用需求,以无几何距离(geometry free, GF)、几何距离不变(geometry-based, GB)、无电离层(ionosphere free, IF)、宽巷(wide lane, WL)、窄巷(narrow lane, NL)以及Melbourne-Wübbena(MW)等为代表的组合得到广泛探讨与应用[20-21]。而在GNSS全系统与全频点联合服务的趋势下,研究者在经典组合模型的基础上进一步发展了无几何无电离层(geometry and ionosphere free, GIF)、五频相位模糊度固定模型等诸多组合[8,22]。理论上,以GNSS原始观测方程为基础,多频观测信息的最优组合主要是基于观测值的噪声最小、电离层延迟最低与组合波长最长准则,进行各频率系数的求取[8]。因此,BDS-3五频内无电离层组合与多频自适应组合精密单点定位(precise point positioning, PPP)模型得到了初步探索[6,23-24],结果表明,GNSS多频观测信息可有效提升定位模型的收敛时间与参数估计精度。

当前,针对如何充分利用GNSS全星座与全频点观测数据问题,以PPP为代表的多频多模GNSS高精度定位模型中主要聚焦于不同频率组合模式的研究[25-26]。由GNSS定位等价性原理可知[27],相同频率条件下不同组合策略之间理论上具有等价性,但考虑不同频率的噪声水平以及组合观测值的电离层延迟与波长等特性均会对模糊度固定与参数解算产生影响[21]。因此,额外的频率增益信息可辅助提升模型性能[6,11,28],但相较于广泛采用的PPP处理策略及主流的定位软件模块[10,29],仍存在两个需克服的问题:(1)GNSS全系统全频点固定组合模式易忽略多频观测信

息，如采用三频无电离层组合无法顾及BDS-3额外的双频信息；(2)接收机的性能存在差异导致部分观测信息缺失，如BDS-3单频与其他GNSS系统双频观测数据无法同时兼顾。因此，以GNSS多频观测数据最优组合为基础，有效顾及用户端多频观测信息，构建观测域内GNSS全系统全频点的观测数据组合模型需深入探索。

GNSS观测数据质量作为影响位置服务性能的核心因素之一，其中多路径误差与用户端观测条件强相关[16, 30]。为了削弱多路径误差，学者主要从时间域滤波、空间域回归与非参数化建模等角度进行处理[30-32]。然而，针对当前高精度位置服务需求而言，虽然多路径误差处理模型已得到长足发展，但仍存在两个需要优化的关键问题：(1)如何实现单历元观测数据中多路径误差快速提取，传统策略需利用长期历史数据进行建模处理[16, 33]；(2)如何充分利用多频观测数据的优势实现多路径误差的建模，在观测数据预处理阶段广泛采用双频组合提取多路径误差[34]，无法有效顾及多频提供的额外观测。因此，在GNSS全系统与全频点服务的现状下，有必要充分挖掘多频观测信息，实现用户端多路径误差快速削弱处理。

本文以GNSS多频观测数据为基础，通过构建多频观测数据最优组合，对用户端伪距多路径误差削弱模型与定位观测方程构建进行探究，设计了一种基于GNSS全系统全频点观测的伪距多路径误差修正及定位模型，实现多频观测数据的充分利用与定位性能的提升。

1　GNSS全频点组合定位模型

受用户端复杂观测环境影响，GNSS观测数据中不可避免地包含了显著的多路径与噪声等误差项。本文借助GNSS多频观测数据在建模方面的优势，利用多频线性组合对伪距多路径误差进行建模与消除。设GNSS定位的原始观测方程表示为：

$$\begin{cases} L^s_{r,f_i}=\rho^s_r+\mathrm{d}t_r-\mathrm{d}t^s+T_r-\kappa^s_{f_i}I^s_{r,1}+ \\ \qquad \lambda N^s_{r,f_i}+b^s_{r,f_i}-b^s_{f_i}+\varepsilon^s_{r,f_i} \\ P^s_{r,f_i}=\rho^s_r+\mathrm{d}t_r-\mathrm{d}t^s+T_r+\kappa^s_{f_i}I^s_{r,1}+ \\ \qquad M_{f_i}+d^s_{r,f_i}-d^s_{f_i}+\nu^s_{r,f_i} \end{cases} \tag{1}$$

式中，P与L分别表示伪距与载波观测值；f_i为第i频率；s与r分别表示卫星与测站；ρ、$\mathrm{d}t_r$、$\mathrm{d}t^s$、T与$I^s_{r,1}$分别表示星地间几何距离、接收机钟差、卫星钟差、对流层延迟误差以及第一个频率对应的电离层延迟量；λ、N与κ分别为频率f_i对应的波长、整周模糊度和电离层延迟系数；M_{f_i}表示伪距多路径误差；b与d分别为载波与伪距对应的硬件延迟；ε、ν为载波与伪距观测方程噪声项，相位观测值中的多路径误差暂归为噪声处理。

考虑GNSS载波观测数据噪声显著小于伪距观测噪声，为快速修正伪距多路径误差，可利用多频相位观测数据辅助提取伪距多路径误差。设频率f_i对应的伪距多路径误差为：

$$M_{f_i}=P_{f_i}+\gamma_{f_i}L_{f_i}+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\gamma_{f_j}L_{f_j} \tag{2}$$

式中，n为可获得的观测数据总频率数；γ为多频组合系数。式(2)观测值中包含了与频率相关的电离层延迟误差，在仅考虑电离层、多路径误差影响的前提下，以f_1频率为例，可进一步表示为：

$$\begin{bmatrix} P_{f_1} \\ L_{f_1} \\ \vdots \\ L_{f_i} \\ \vdots \\ L_{f_n} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & -\kappa^s_{f_i} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & -\kappa^s_{f_n} & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \rho^s_{r,0} \\ I^s_{r,1} \\ M_{f_1} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中，$\rho^s_{r,0}$表示观测方程中短时不变的几何距离；M_{f_1}为f_1频率上伪距多路径延迟量。为便于讨论，令式(3)中的变量表示为：

$$L=\begin{bmatrix} P_{f_1} \\ L_{f_1} \\ \vdots \\ L_{f_i} \\ \vdots \\ L_{f_n} \end{bmatrix},\ A=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & -\kappa^s_{f_i} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & -\kappa^s_{f_n} & 0 \end{bmatrix},\ X=\begin{bmatrix} \rho^s_{r,0} \\ I^s_{r,1} \\ M_{f_1} \end{bmatrix} \tag{4}$$

因此，若L中不同观测值对应的协因数阵为$\boldsymbol{Q}$，则式(4)中$\boldsymbol{X}$的解为：

$$\hat{\boldsymbol{X}}=(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}^{-1}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}^{-1}\boldsymbol{L} \tag{5}$$

式中，协因数阵$\boldsymbol{Q}$可根据卫星高度角确定[13]。为实现式(3)中伪距多路径误差的准确分离，可构建转换矩阵$\boldsymbol{H}=[0\ 0\ 1]$。因此，式(5)中参数的解可表示为：

$$\tilde{\boldsymbol{X}}=\boldsymbol{H}\hat{\boldsymbol{X}}=\boldsymbol{H}(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{A}\boldsymbol{Q}^{-1}\boldsymbol{L} \tag{6}$$

联立式(2)与式(6)，可得基于多频观测数据提取伪距多路径误差的组合系数矩阵为：

$$\boldsymbol{\gamma}=\boldsymbol{H}(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{A}\boldsymbol{Q}^{-1} \tag{7}$$

对式(7)展开，可得式(2)中的组合系数通解为：

$$\begin{cases}\gamma_{f_1}=-(\sum_{i=2}^{n}\kappa_i^2-n+1)/G_n\\ \gamma_{f_m}=\dfrac{-(\sum_{i=2}^{n}(\kappa_i^2-\kappa_i\kappa_m+\kappa_i)-(n+1)\kappa_m+2)}{G_n}\\ G_n=\sum_{i=2}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}(\kappa_i-\kappa_j)^2+\sum_{k=2}^{n}(\kappa_k-1)^2\end{cases} \tag{8}$$

通过多频组合系数的求解,可实现GNSS多频观测数据辅助下的伪距多路径误差的快速分离与估计,既规避了长期序列平滑建模处理,也克服了观测噪声与电离层误差影响。例如,在可获得BDS-3五频观测数据条件下,相应的伪距多路径误差估计中多频观测数据组合系数见表1。

表1 BDS-3不同频率组合条件下伪距多路径误差提取模型系数

Table 1 Model Coefficients of BDS-3 Different Frequencies Combinations in Estimating Code Multipath Errors

多频组合	B1C	B1I	B3I	B2b	B2a	噪声
		2.944	−1.944			3.527
	55.251	−54.251				77.433
	2.844		−1.844			3.389
双频	2.422			−1.422		2.809
	2.261				−1.261	2.588
		2.314			−1.314	2.662
			7.148		−6.148	9.429
	1.503	1.388	−1.891			2.786
三频	1.172	1.115			−1.287	2.067
	2.290		−0.094		−1.196	2.586
四频	1.224	1.171	−0.336		−1.058	2.025
五频	1.216	1.170	−0.123	−0.520	−0.742	1.919

同时,考虑GNSS多频观测信息尚未得到充分利用,本文基于GNSS多频组合模型进行多系统联合定位处理。在式(1)原始观测方程基础上,构建多频GB IF组合模型,充分挖掘多频观测信息的优势:

$$\begin{cases}L_{r,c}^s=\sum_{f_i=1}^{n}\beta_{f_i}L_{r,f_i}^s=\rho_r^s+\mathrm{d}t_r+B_{r,c}^s+\\ \qquad\lambda_c N_{r,c}^s+T_r+\zeta_{r,c}^s\\ P_{r,c}^s=\sum_{f_i=1}^{n}\beta_{f_i}P_{r,f_i}^s=\rho_r^s+\mathrm{d}t_r+T_r+\theta_{r,c}^s\end{cases} \tag{9}$$

式中,$L_{r,c}^s$与$P_{r,c}^s$分别表示组合后的载波相位与伪距观测值;β表示不同频率观测值组合系数;λ_c、$N_{r,c}^s$分别为组合后的波长和模糊度参数;为顾及不同频率观测数据间差异性,引入频间偏差参数$B_{r,c}^s$;组合后的相位与伪距观测模型噪声分别为$\zeta_{r,c}^s$与$\theta_{r,c}^s$。

由于精密定位模型中一般采用分析中心提供的精密卫星钟差与轨道产品,其模糊度参数中吸收了硬件延迟参数。而由式(1)更新为式(9)需对组合系数β进行准确求取,参考伪距多路径误差估计中的多频观测组合系数求取方法,以多频相位观测数据组合为例:

$$\begin{bmatrix}L_{r,f_1}^s\\L_{r,f_2}^s\\\vdots\\L_{r,f_n}^s\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&-1\\1&-\kappa_{f_2}^s\\\vdots&\vdots\\1&-\kappa_{f_n}^s\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\rho_{r,0}^s\\I_{r,1}^s\end{bmatrix} \tag{10}$$

式中,$\rho_{r,0}^s$表示消除多路径误差并进行预处理后的短时几何不变量。式(10)的矩阵形式为:

$$\boldsymbol{L}'=\begin{bmatrix}L_{r,f_1}^s\\L_{r,f_2}^s\\\vdots\\L_{r,f_n}^s\end{bmatrix},\ \boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}1&-1\\1&-\kappa_{f_2}^s\\\vdots&\vdots\\1&-\kappa_{f_n}^s\end{bmatrix},\ \boldsymbol{X}'=\begin{bmatrix}\rho_{r,0}^s\\I_{r,1}^s\end{bmatrix} \tag{11}$$

同样地,令观测值协因数阵为$\boldsymbol{Q}$,则待估参数的解可表示为:

$$\hat{\boldsymbol{X}}'=(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}^{-1}\boldsymbol{L}' \tag{12}$$

为构建无电离层组合且保持几何距离不变特性,可引入系数矩阵$\boldsymbol{H}'=[1\ 0]$,即:

$$\hat{\boldsymbol{X}}'=\boldsymbol{H}'(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}^{-1}\boldsymbol{L}' \tag{13}$$

因此,多频组合模型系数矩阵$\boldsymbol{\beta}$可表示为:

$$\boldsymbol{\beta}=\boldsymbol{H}'(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}^{-1} \tag{14}$$

式(14)可实现GNSS多频组合模型系数的最优求解,一方面在参数求解过程中利用了最小二乘算法,可保证多频组合模型噪声最小且为无偏估计;另一方面通过引入转换系数矩阵可有效消除电离层误差影响。同时,为充分利用多系统观测数据,式(9)中需进一步增加系统偏差参数,即:

$$\begin{cases}L_{r,c}^s=\sum_{f_i=1}^{n}\beta_{f_i}L_{r,f_i}^s=\rho_r^s+\mathrm{d}t_r+\lambda_c N_{r,c}^s+\\ \qquad K_r^S+T_r+B_{r,c}^s+\zeta_{r,c}^s\\ P_{r,c}^s=\sum_{f_i=1}^{n}\beta_{f_i}P_{r,f_i}^s=\rho_r^s+\mathrm{d}t_r+T_r+F_r^S+\\ \qquad\theta_{r,c}^s\end{cases} \tag{15}$$

式中,K为系统偏差参数;上标S表示卫星系统,通常以GPS为参考。考虑与GNSS全系统全频点相关的偏差参数不成熟的现状,系统偏差与频间偏差均作为待估参数,并构建零基准约束条件

进行估计。在GNSS全系统全频点组合观测模型构建后，需进一步更新随机模型，通常采用高度角定权策略配置观测值方差：

$$\begin{cases}(\delta_L^s)^2=\sigma_0^2+\sigma_0^2/\sin^2 E\\(\delta_P^s)^2=\alpha_0^2+\alpha_0^2/\sin^2 E\end{cases}\tag{16}$$

式中，$(\delta_L^s)^2$与$(\delta_P^s)^2$分别表示相位与伪距观测值方差；σ_0与α_0分别为对应的先验中误差；E为卫星高度角。在GNSS非差非组合模型基础上，随机模型可表示为：

$$\boldsymbol{D}_{\mathrm{UC}}=(\delta^s)^2\boldsymbol{I}\tag{17}$$

式中，$\boldsymbol{D}_{\mathrm{UC}}$表示非差非组合模型方差-协方差阵；$\boldsymbol{I}$为单位阵。因此，在GNSS多频组合模型系数准确获得的前提下，多频多系统联合定位随机模型可更新为：

$$\boldsymbol{D}_c=\boldsymbol{F}_\beta\boldsymbol{D}_{\mathrm{UC}}(\boldsymbol{F}_\beta^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}}\tag{18}$$

式中，$\boldsymbol{F}_\beta=[\beta_{f_1}\quad\beta_{f_2}\quad\cdots\quad\beta_{f_n}]$表示多频组合系数阵。

综上，通过GNSS多系统多频观测数据最优组合构建全系统全频点定位模型，可实现观测数据中伪距多路径误差的快速提取，并充分挖掘定位模型中多频观测数据，间接地提升了多频观测数据的利用率和定位模型的性能。

2　GNSS全频点组合定位分析

2.1　基于GNSS全系统全频点观测的多路径误差处理

为验证基于GNSS全系统全频点观测的多路径误差修正及定位模型性能，分别从静态与动态观测数据角度进行对比分析。首先，筛选具有多频观测数据的多GNSS实验（multi-GNSS experiment，MGEX）与国际GNSS监测评估系统（international GNSS monitoring assessment system，iGMAS）测站。在连续一周GNSS多频数据基础上（2022年年积日（day of year，DOY）253—259），以BDS-3观测数据为例，分别基于传统的伪距多路径误差处理模型（传统双频）[34]、多频组合模型系数任意选取（多频组合）和本文提出的基于GNSS全系统全频点观测的多路径误差修正模型（多频最优）为对比方案，图1与图2中分别选取了MGEX测站（WUH2）与iGMAS测站（BYNS）不同处理方案下不同伪距观测数据的多路径误差序列。

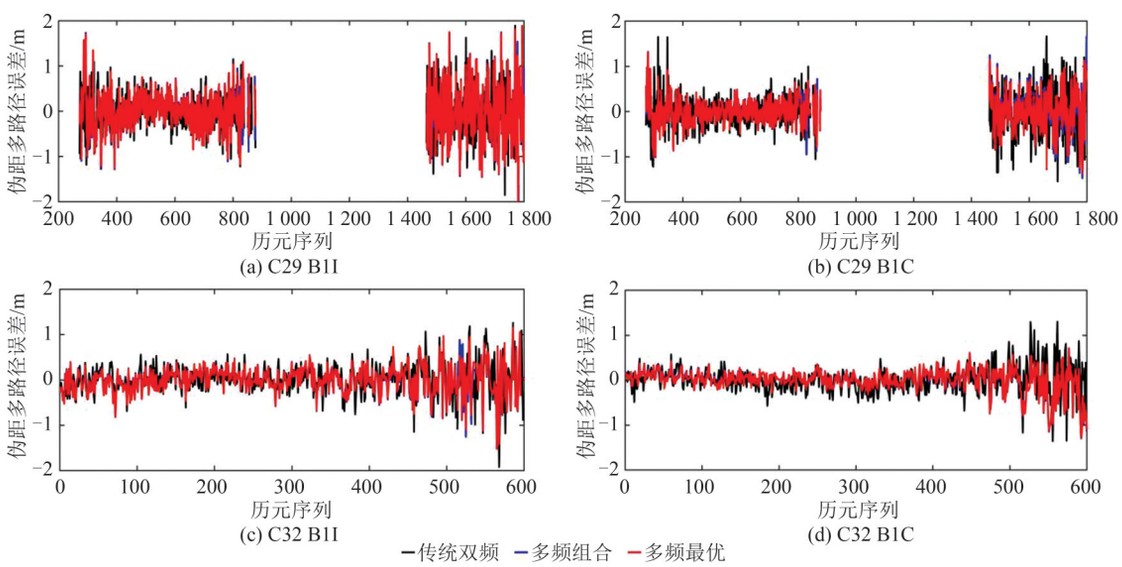


图1　MGEX测站（WUH2）的BDS-3伪距多路径误差序列（2022年DOY 253）

Fig. 1　BDS-3 Code Multipath Error Series of MGEX Station (WUH2) (DOY 253, 2022)

图1、图2结果表明，本文提出的GNSS全系统全频点观测的多路径误差修正模型与传统双频模型所估计的结果大致相等，间接地验证了采用多频辅助多路径误差处理方法的正确性。相较于传统双频模型与多频随机组合模型而言，本文提出的GNSS全系统全频点观测多路径误差修正模型提取的伪距多路径数值略小，主要是有效顾及了噪声与电离层延迟的影响。

由于iGMAS与MGEX测站较稳定，静态实验观测数据中隐含的伪距多路径误差不显著。进一步以动态采集的GNSS多频观测数据为基础，分析不同方案下伪距多路径误差处理效果。实验中一台接收机固定于楼顶，另一台接收机架设于小车顶部，具体架设场景及小车运行轨迹如图3所示。实验数据采集时间段为2021年7月16日上午8时40分至10时30分，观测历元间隔为

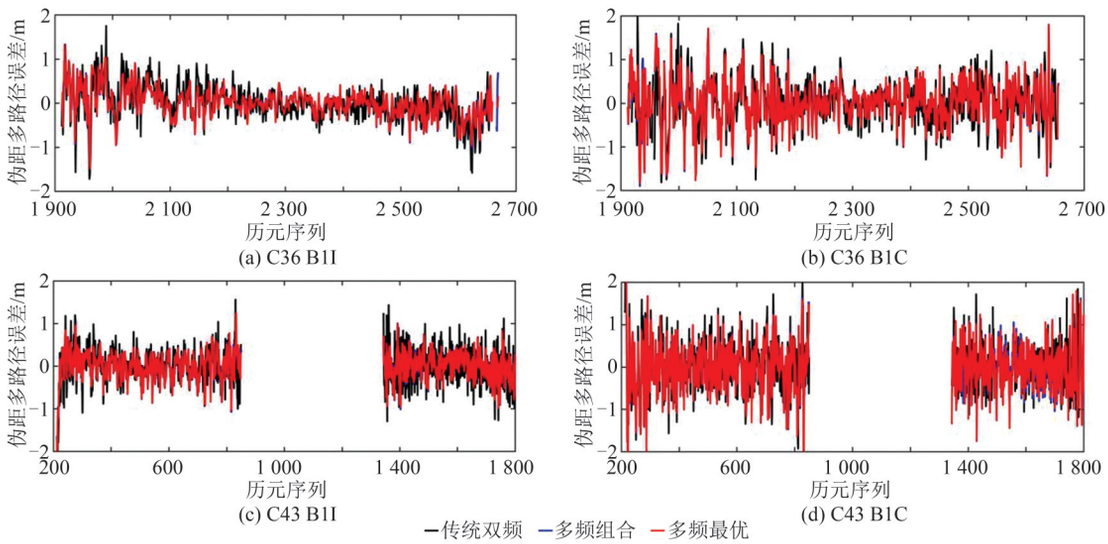


图2 iGMAS测站(BYNS)的BDS-3伪距多路径误差序列(2022年DOY 253)

Fig. 2 BDS-3 Code Multipath Error Series of iGMAS Station (BYNS) (DOY 253, 2022)

1 s。以B1C与B1I伪距多路径误差为例,图4中给出了静态参考站BDS-3观测数据不同频率的多路径误差序列,表2中分别统计了实验周期内C32与C41卫星观测数据不同方案下的多路径误差均值与均方根(root mean square,RMS)。静态参考站实验结果表明,不同方案多路径误差均值趋于0,其与多路径误差的随机特性与系统特性相符[31-32,34],实际数据处理中多路径误差建模可将其分为系统性与随机性两部分。但采用本文提出的基于GNSS全系统全频点观测的多路径误差修正方法获得的结果波动量级略小,且均值更接近0,间接说明了所提取的多路径误差更符合实际结果(克服了噪声与电离层影响)。



图3 GNSS动态数据采集轨迹

Fig. 3 Trajectory of GNSS Observations Collection in Kinematics Experiments

进一步以移动站采集的多频观测数据为基础,给出了动态条件下多路径误差提取效果。如图5所示,以C23与C38卫星B1C与B1I频率伪距多路径误差为例,分别给出了3种方案下的多路径误差分布的直方图。表3中统计了动态实验周期内C23与C38卫星B1C与B1I的伪距多路径误差。动态条件下,基于GNSS全系统全频点观测的多路径误差修正方法可获得分布更优的多路径结果;且相较于传统双频建模策略,可实现多路径误差的快速计算并降低观测噪声影响。

由于上述多路径误差提取实验中无法说明本文提出的基于GNSS全系统全频点观测的多路径误差修正方法对定位参数的贡献,进一步利用相同的实验数据开展不同多路径处理方案下的定位对比分析。类似地,第一组实验以B1I观测数据为基础,在定位中分别以3种多路径处理方案(原始不处理(B1I原始)、双频组合(B1I双频)和多频组合(B1I多频))为前提,开展BDS-3 B1I单频条件下的实验分析。为具体说明不同方案定位效果,图6中给出了两个MGEX(DGAR、GAMG)测站和两个iGMAS测站(CHU1、SHA1)测站的静态定位一天(2022年DOY 253)位置残差序列;表4中列出了部分测站定位东(east, E)、北(north, N)、天(up, U)方向的实验周期内(2022年DOY 253—259)的精度统计。

静态BDS-3 B1I单频定位实验表明,基于GNSS全系统全频点观测的多路径误差修正方法,可获得略优于传统双频模式下的定位结果。进一步以动态采集的GNSS多频观测数据为基础,分析静态参考站BDS-3双频观测数据(B1I+B3I)定位中不同伪距多路径误差处理方案(B1I+B3I原始、B1I+B3I传统双频、B1I+B3I

多频组合、B1I+B3I多频最优）定位结果，相应的位置残差序列如图7所示。显然，在充分利用多频观测信息的条件下，对伪距多路径误差进行准确修正处理，可实现测站定位收敛时间与精度的一定程度提升，主要是在数据预处理阶段对伪距多路径误差进行了准确的建模与消除。因此，本文提出的基于GNSS全系统全频点观测的多路径误差修正方法是可行的。

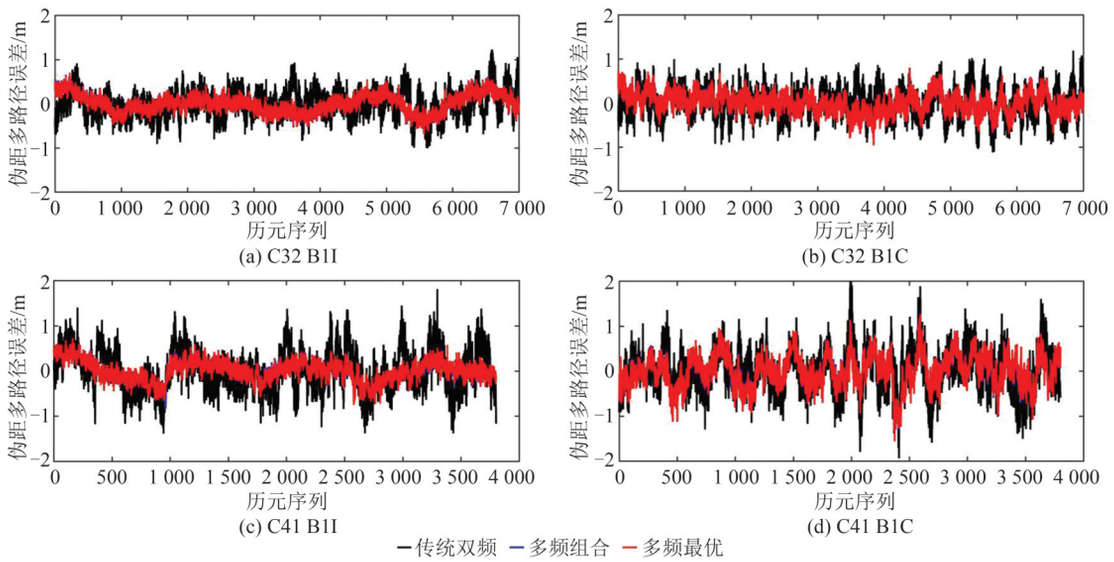


图4　静态参考站提取的BDS-3伪距多路径误差序列

Fig. 4　Code Multipath Errors Series of BDS-3 Observations Based on Static Station

表2　不同频率组合方案提取的B1C与B1I伪距多路径误差统计/m

Table 2　Statistical Results of B1C and B1I Code Multipath Errors Based on Different Combination Schemes/m

频率	方案	RMS		平均值/10^{-15}	
		C32	C41	C32	C41
B1C	传统双频	0.343	0.505	13.65	−105.4
	多频组合	0.229	0.367	−4.002	−7.216
	多频最优	0.229	0.368	4.366	3.054
B1I	传统双频	0.309	0.475	−4.975	−64.91
	多频组合	0.211	0.231	5.894	−2.429
	多频最优	0.207	0.231	−1.051	−2.100

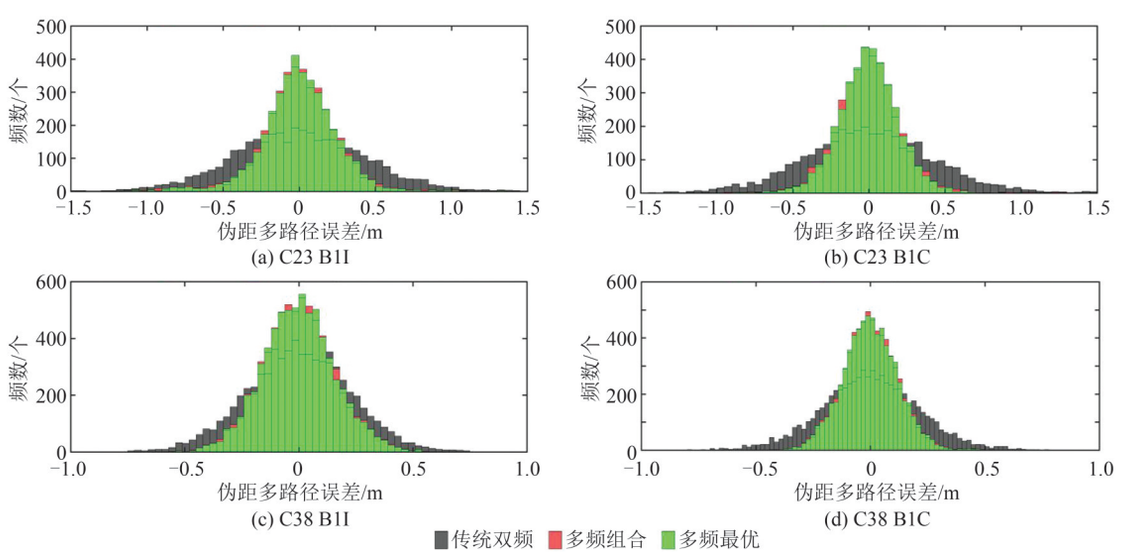


图5　动态条件下不同方案伪距多路径误差分布

Fig. 5　Distribution of Code Multipath Errors Series of Different Schemes in Kinematics Experiments

表3 不同组合方案提取的动态伪距多路径误差统计/m

Table 3 Statistical Results of Code Multipath Errors Based on Different Kinematics Experiment Schemes/m

频率	方案	RMS		平均值/10^{-16}	
		C23	C38	C23	C38
B1C	传统双频	0.425	0.215	24.3	82.8
	多频组合	0.228	0.121	10.5	0.130
	多频最优	0.213	0.120	−3.39	−6.51
B1I	传统双频	0.431	0.227	−28.0	267
	多频组合	0.27	0.159	−5.79	6.48
	多频最优	0.263	0.158	1.56	8.41

2.2 GNSS全系统全频点定位实验分析

需要注意的是,定位观测数据预处理中已融入了基于GNSS全系统全频点观测的多路径误差修正方法。同时,为验证多频观测信息对定位模型的增强作用,以无电离层组合模型为基础,分别利用BDS-3双频组合(BDS-3双频IF)、BDS-3多频组合(BDS-3多频IF)以及GNSS全系统全频点组合(GNSS多频IF)为对比方案,开展PPP定位分析。图8中给出了CHU1与GAMG测站的残差序列(2022年DOY 253)和位置精度因子(positions dilution of precision, PDOP)序列。为具体说明定位效果,表4中分别给出了MGEX与iGMAS一周(2022年DOY 253至259)的定位精度与收敛时间统计。图8与表5的结果表明,通过引入多频观测信息,相较于传统BDS-3双频定位模型而言,GNSS全系统全频点定位模式下可实现测站定位精度与收敛时间的改善。由于部分多频组合系数未实现最优筛选,BDS-3多频定位存在部分测站方向略低于BDS-3双频结果。总体上,实验证明了GNSS多频观测信息对定位精度与收敛时间起到改善作用。因此,相较于传统的单频或双频定位模型而言,有必要将丰富的多频观测数据充分融入定位模型中。

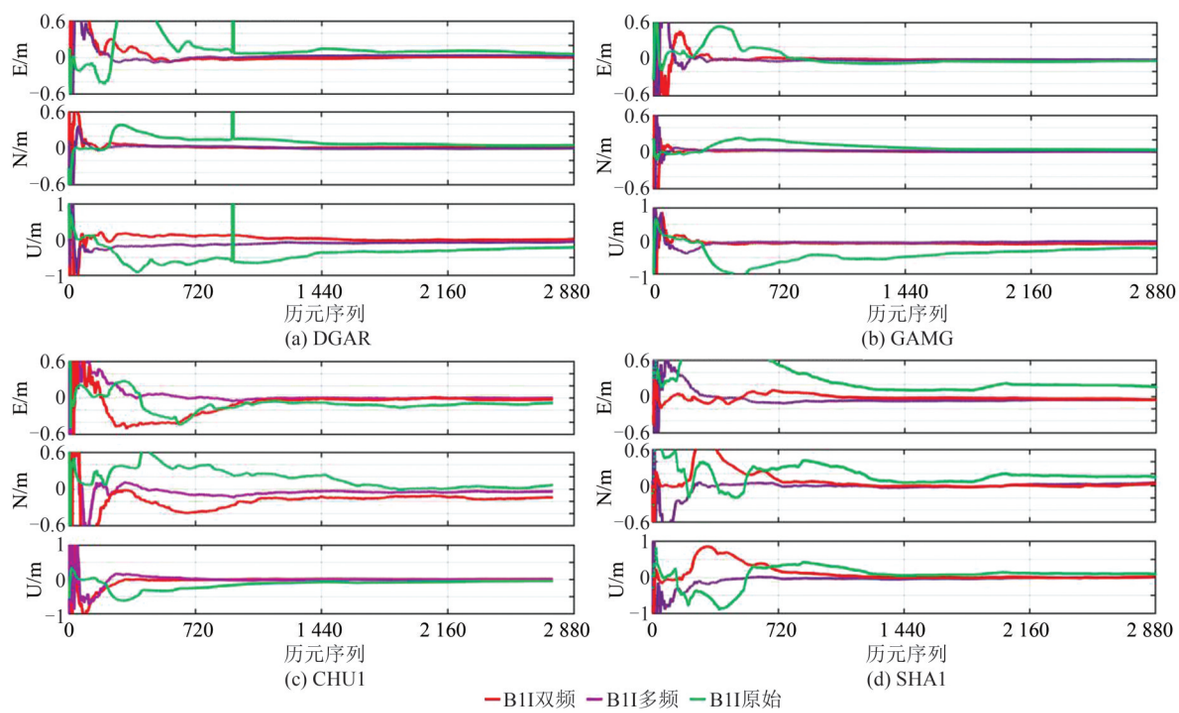


图6 不同伪距多路径误差处理方案的BDS-3 B1I单频定位残差序列(2022年DOY 253)

Fig. 6 Position Residuals of BDS-3 B1I PPP Solutions Based on Different Schemes of Code Multipath Errors (DOY 253, 2022)

多频观测信息可实现定位模型性能提升,前提条件是多频观测信息的合理组合。为分析本文提出的基于GNSS全系统全频点观测的定位模型,进一步以BDS-3多频任意组合(BDS-3多频IF)与BDS-3多频最优组合(BDS-3最优IF)为实验方案,其中最优组合系数可根据式(8)进行解算。图9中分别给出了4个测站(BJF1、WUH1、DGAR和GAMG)不同方案下的一天位置残差序列,表6中则给出了两种方案下不同测站的一周(2022年DOY 253—259)定位精度及其收敛时间统计。由于最优IF组合中存在部分测站收敛过程残差波动现象,表5中出现部分测站收敛时间增加。图9与表5中实验结果显示,采用BDS-3多频观测数据最优组合策略,E、N、U方向定位精度至少可分别提升6.2%、4.9%、31.3%,且相应收敛时间基本实现了缩短。

表 4　不同多路径误差处理方案下 BDS-3 B1I 单频 PPP 定位精度统计/cm

Table 4　Accuracy of BDS-3 B1I PPP Based on Different Schemes on B1I Code Multipath Errors/cm

	B1I原始			B1I双频			B1I多频		
测站	E	N	U	E	N	U	E	N	U
CHU1	26.662	13.271	11.426	3.865	3.422	3.505	3.037	3.250	3.239
KUN1	11.565	20.118	29.159	7.644	14.510	22.454	7.746	11.671	18.108
SHA1	24.540	25.497	24.633	10.804	15.458	10.377	6.572	6.437	6.128
WUH1	19.819	20.851	6.343	14.343	16.838	3.265	4.683	7.713	2.797
DGAR	19.941	7.501	44.810	1.511	2.067	6.398	1.218	2.260	8.353
GAMG	13.702	7.392	32.497	2.744	1.085	8.341	2.092	1.047	3.423

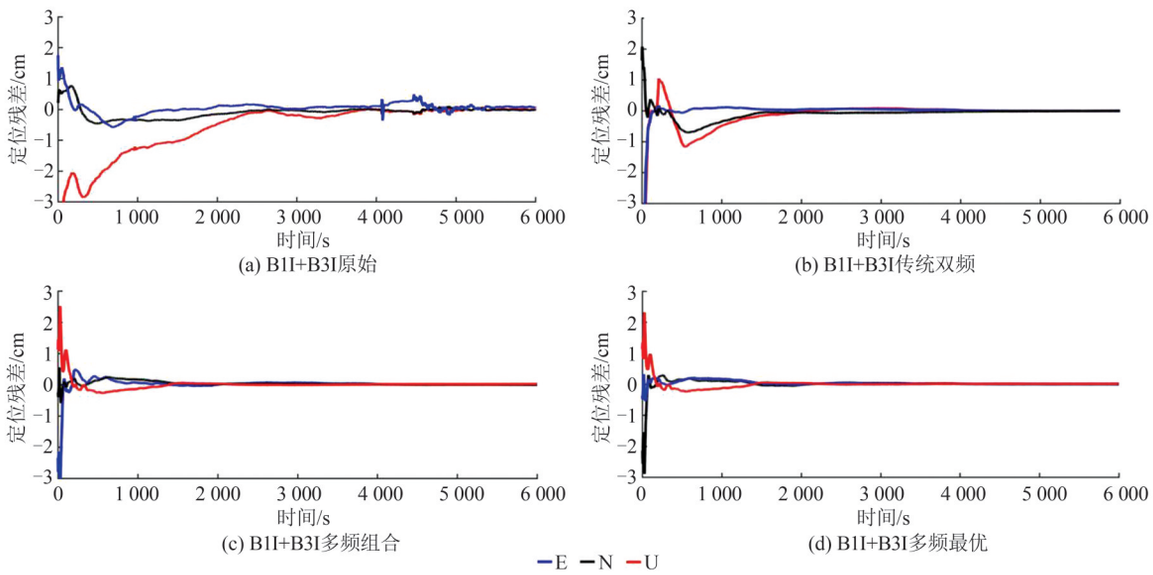


图 7　基于静态参考站的 BDS-3 B1I+B3I 定位残差序列

Fig. 7　Positions Residuals of BDS-3 B1I+B3I PPP Based on Static Station Observations

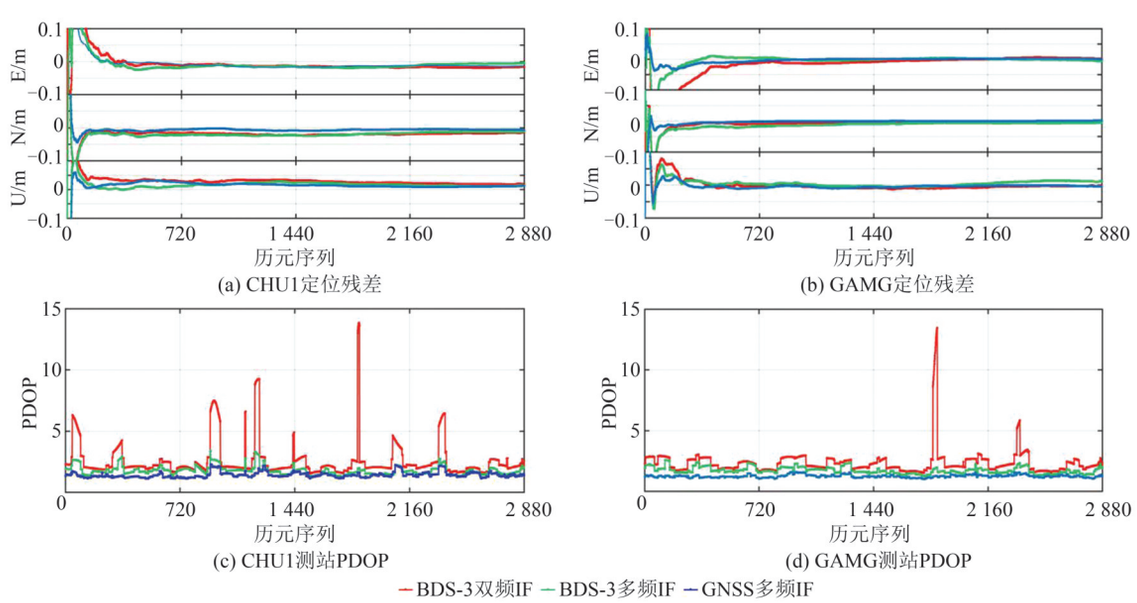


图 8　基于不同定位观测组合方案的定位残差与 PDOP 序列

Fig. 8　Position Residuals and PDOP Series Based on Different Schemes of Observation Combinations

考虑实际应用中 GNSS 观测数据质量并不稳定,进一步基于动态采集的 GNSS 多频观测数据,开展不同组合模式下的动态定位实验。为分析动态精度精度,实验中以移动站与动态站间组成的差分模型为基础,基于 Inertial Explorer(IE)软件计算出的位置参考序列为参考。动态定位

表5 不同频率组合方案下定位精度与收敛时间统计

Table 5 Results of Positioning and Its Convergence Time Based on Different Frequencies Combinations

模型	测站	收敛精度/cm			收敛时间/min		
		E	N	U	E	N	U
BDS-3双频IF	DGAR	1.029	0.778	4.228	78.071	18.357	43.643
	GAMG	0.628	0.982	1.180	145.500	26.643	27.857
	CHU1	2.096	1.461	2.582	55.600	38.100	34.600
	WUH1	2.123	2.253	1.538	89.000	66.833	17.417
BDS-3多频IF	DGAR	0.900	0.747	4.370	73.857	19.357	39.929
	GAMG	0.781	0.465	1.511	140.214	22.286	26.500
	CHU1	1.878	1.897	2.853	53.700	39.000	26.900
	WUH1	1.695	1.660	1.353	74.917	69.250	15.583
GNSS多频IF	DGAR	0.772	0.586	2.197	72.071	13.143	34.357
	GAMG	0.448	0.330	1.250	52.214	24.071	26.714
	CHU1	1.418	1.420	1.264	44.500	34.600	23.200
	WUH1	1.355	1.579	1.248	43.333	58.833	12.917

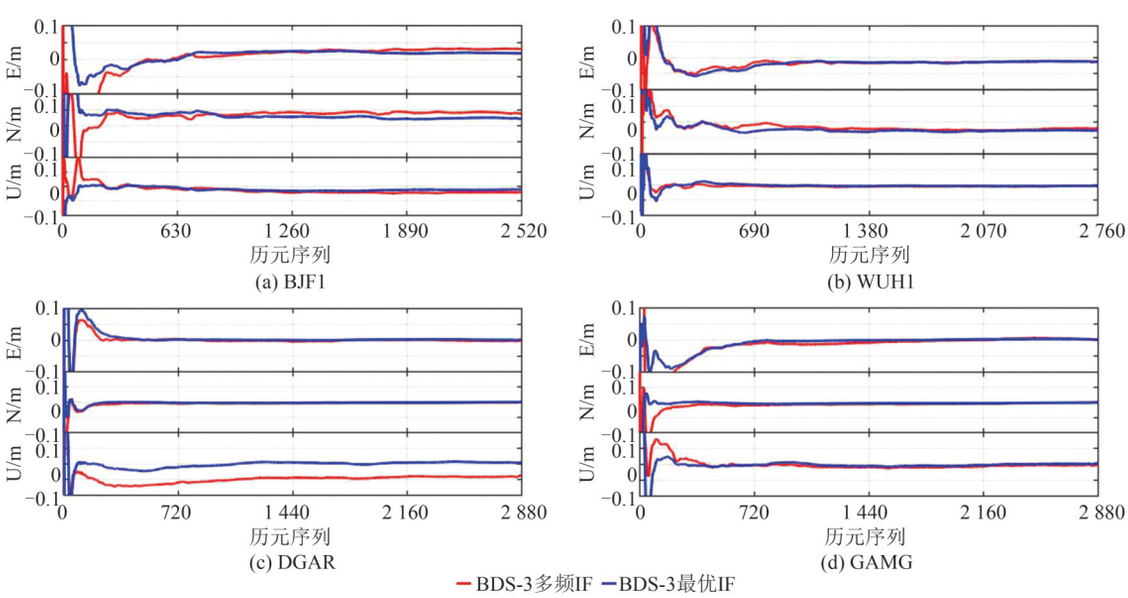


图9 基于BDS-3多频不同组合方案的定位残差序列

Fig. 9 Position Residuals Series Based on Different BDS-3 Observations Combination Schemes

表6 不同BDS-3多频组合方案下定位精度与收敛时间

Table 6 Positions Accuracy and Convergence Time of Different Combination Schemes of BDS-3 Multi-frequency Observations

模型	测站	收敛精度/cm			收敛时间/min		
		E	N	U	E	N	U
BDS-3多频IF	DGAR	0.900	0.747	4.370	73.857	19.357	39.929
	GAMG	0.781	0.465	1.511	140.214	22.286	26.500
	BJF1	2.538	2.889	1.868	66.500	115.500	17.625
	WUH1	1.695	1.660	1.353	74.917	69.250	15.583
BDS-3最优IF	DGAR	0.766	0.678	1.360	73.202	13.508	33.500
	GAMG	0.733	0.382	0.952	61.214	25.085	27.010
	BJF1	2.130	2.687	1.284	67.000	44.167	11.667
	WUH1	1.381	1.579	0.720	60.125	62.381	11.221

实验中共设计了4套对比方案,分别为BDS-3传统双频组合(B1C+B2a)、GNSS双频组合联合解算(GNSS双频)、GNSS多频组合联合解算(GNSS多频)以及GNSS多频最优组合联合解算(GNSS最优)策略。为描述观测条件,图10给出了实验中可见卫星数及以BDS-3星座为核心的BDS-3+GLONASS(BDS-3+R)、BDS-3+Galileo(BDS-3+E)、BDS-3+GPS(BDS-3+G)及GNSS联合处理下的定位PDOP序列。理论上,GNSS全星座全频点联合服务模式下可获得精度最优的定位结果。图11中给出了动态定位模式下的4种方案位置残差序列,表7中给出了不同组合模式下的位置收敛精度及其提升率。实验结果表明,基于PPP模型的不同定位策略结果均呈现收敛过程,且GNSS多频最优组合联合解算方案的动态位置精度可实现较传统BDS-3双频E、N、U方向分别提升81.3%、16.7%与79.0%。实际上,通过图11可明显发现,通过GNSS多频最优组合得到的动态位置精度较其他方向有一定提升。显然,利用本文提出的基于GNSS全系统全频点观测的定位模型可获得性能更优的定位结果。

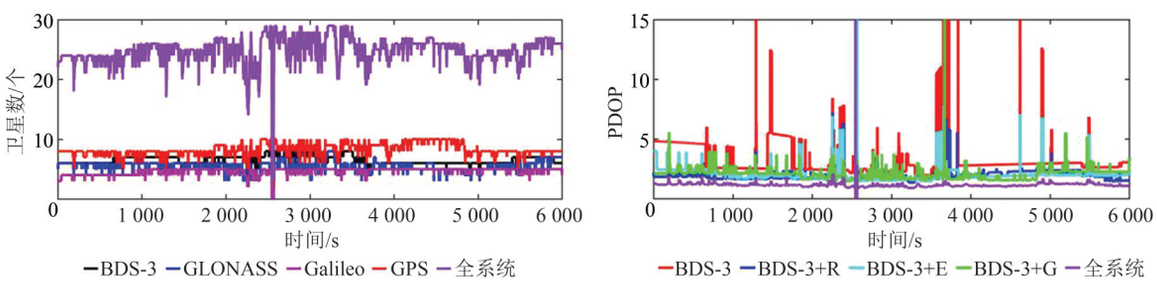


图10　动态定位模式下可见卫星数与PDOP序列

Fig. 10　Available Satellites Numbers and PDOP Series of Kinematics Experiments

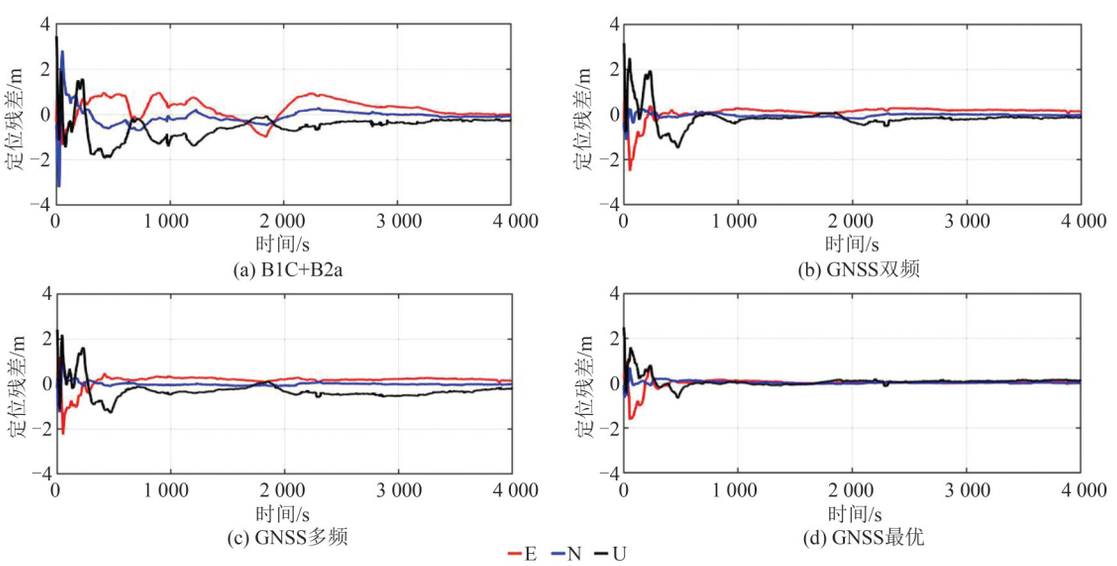


图11　不同GNSS多频组合模式下动态定位残差序列

Fig. 11　Positions Residuals of Different GNSS Multi-frequency Combination Kinematics Positioning Schemes

表7　不同GNSS多频组合模型动态精度及其提升率

Table 7　Accuracy of Kinematics Experiment and Its Improvements Based on Different Schemes

组合模型	E/m	提升率/%	N/m	提升率/%	U/m	提升率/%
B1C+B2a	0.166		0.018		0.520	
GNSS双频	0.101	39.2	0.012	33.3	0.104	80.0
GNSS多频	0.108	35.0	0.009	50.0	0.173	66.7
GNSS最优	0.031	81.3	0.015	16.7	0.109	79.0

3　结　语

在多频多模GNSS全系统全频点同步服务的背景下,丰富的观测信息为位置服务性能提升提供新途径。为实现GNSS多频观测信息的充分利用,本文提出了一种基于GNSS全系统全频点观测的多路径误差修正及定位模型,即通过构建多频观测数据最优组合模型,对观测数据中伪距多路径误差进行消除,并将全系统全频点观测

数据融入定位模型中。iGMAS与MGEX静态测站与车载动态多系统多频观测数据测试结果表明,本文提出的基于GNSS全系统全频点观测的伪距多路径修正策略可有效克服观测噪声与电离层延迟等因素影响,尤其是在动态条件下,较传统双频组合平滑模型而言,可快速准确地提取伪距多路径误差。在GNSS定位中,BDS-3多频观测数据最优组合策略静态定位条件下,较BDS-3多频观测数据随机组合测站E、N、U方向的定位精度至少分别提升6.2%、4.9%、31.3%以上;在实测的动态定位模式下,GNSS多频最优组合方案的动态位置精度可实现较传统BDS-3双频E、N、U方向分别提升81.3%、16.7%与79.0%;且在GNSS多频观测信息的增强下,位置参数收敛时间实现了显著缩短。因此,本文提出的基于GNSS全系统全频点观测的定位模型对提升观测数据利用率与改善定位性能具有一定意义。但是,如实验结果所示,在多频观测信息不同组合模式下,存在部分测站精度与收敛性能降低的现象,主要是由于GNSS多频数据处理中存在多种未定义的偏差,如频间偏差、码间偏差等,下一步研究中将对偏差参数进行统一定义处理,并构建与观测值相关的偏差参数,实现GNSS多频定位模型简化与稳健性提升。

参 考 文 献

[1] HEIN G W. Status, Perspectives and Trends of Satellite Navigation[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1): 22.

[2] 卞鸿巍, 许江宁, 何泓洋, 等. 国家综合PNT体系弹性概念[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(9): 1265-1272.
BIAN Hongwei, XU Jiangning, HE Hongyang, et al. The Concept of Resilience of National Comprehensive PNT System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(9): 1265-1272.

[3] YANG Y X, REN X, JIA X L, et al. Development Trends of the National Secure PNT System Based on BDS[J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 66(5): 929-938.

[4] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, PRANGE L, et al. The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS): Achievements, Prospects and Challenges[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(7): 1671-1697.

[5] YANG Y X, DING Q, GAO W G, et al. Principle and Performance of BDSBAS and PPP-B2b of BDS-3[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 5.

[6] HU C, WANG Q X, WU Z Y, et al. A Mixed Multi-frequency Precise Point Positioning Strategy Based on the Combination of BDS-3 and GNSS Multi-Frequency Observations[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(2): 025008.

[7] 王西龙, 许小龙, 赵齐乐. 北斗三号系统信号质量分析及轨道精度验证[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(4): 611-619.
WANG Xilong, XU Xiaolong, ZHAO Qile. Signal Quality Analysis and Orbit Accuracy Verification of BDS-3[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(4): 611-619.

[8] 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.

[9] Teunissen P., Montenbruck O. Handbook of Global Navigation Satellite Systems[M]. Berlin: Springer, 2017.

[10] SHI J B, OUYANG C H, HUANG Y S, et al. Assessment of BDS-3 Global Positioning Service: Ephemeris, SPP, PPP, RTK, and New Signal[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(3): 81.

[11] JIN S G, SU K. PPP Models and Performances from Single- to Quad-Frequency BDS Observations[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1): 16.

[12] ZHANG Z T, LI B F, HE X F, et al. Models, Methods and Assessment of Four-Frequency Carrier Ambiguity Resolution for BeiDou-3 Observations[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(4): 96.

[13] 耿江辉, 闫哲, 温强. 多系统GNSS卫星钟差和偏差产品综合:IGS第3次重处理[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1070-1081.
GENG Jianghui, YAN Zhe, WEN Qiang. Multi-GNSS Satellite Clock and Bias Product Combination: The Third IGS Reprocessing Campaign[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1070-1081.

[14] 曹新运, 王坚. GPS三频非差观测值探测与修复周跳[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(4): 450-456.
CAO Xinyun, WANG Jian. Cycle-Slip Detection and Repair Using GPS Triple-Frequency Un-Differen-

ced Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(4): 450-456.

[15] KUANG K F, WANG J, HAN H Z. Real-Time BDS-3 Clock Estimation with a Multi-frequency Uncombined Model Including New B1C/B2a Signals[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(4): 966.

[16] 胡超, 王中元, 吕伟才, 等. 一种顾及先验约束的北斗观测数据多路径一步修正模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 101-112.
HU Chao, WANG Zhongyuan, LÜ Weicai, et al. A One-Step Multipath Delay Correction Model for BeiDou Satellite Observations with Prior Constraint[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(1): 101-112.

[17] 李昕, 张小红. BDS-2和BDS-3卫星伪距多路径偏差特性比较[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(2): 191-194.
LI Xin, ZHANG Xiaohong. Comparison of Satellite-Induced Code Bias Between BDS-2 and BDS-3 Satellites[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(2): 191-194.

[18] Han S, Rizos C. The Impact of Two Additional Civilian GPS Frequencies on Ambiguity Resolution Strategies[C]//ION 55th Annual Meeting, Alexandria, VA, USA, 1999.

[19] 于兴旺, 张小红, 聂桂根. GPS/Galileo多频组合差分定位研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(7): 821-824.
YU Xingwang, ZHANG Xiaohong, NIE Guigen. GPS/Galileo Multi-frequency Combined Differential Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(7): 821-824.

[20] ZHANG X H, HE X Y. BDS Triple-Frequency Carrier-Phase Linear Combination Models and Their Characteristics[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(6): 896-905.

[21] GUO Z C, YU X X, HU C, et al. Research on Linear Combination Models of BDS Multi-frequency Observations and Their Characteristics[J]. *Sustainability*, 2022, 14(14): 8644.

[22] LI B F, FENG Y M, SHEN Y Z. Three Carrier Ambiguity Resolution: Distance-Independent Performance Demonstrated Using Semi-Generated Triple Frequency GPS Signals[J]. *GPS Solutions*, 2010, 14(2): 177-184.

[23] WANG Z Y, WANG R G, WANG Y Y, et al. Modelling and Assessment of a New Triple-Frequency IF1213 PPP with BDS/GPS[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(18): 4509.

[24] WU Z Y, WANG Q X, HU C, et al. Modeling and Assessment of Five-Frequency BDS Precise Point Positioning[J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 8.

[25] GUO F, ZHANG X H, WANG J L, et al. Modeling and Assessment of Triple-Frequency BDS Precise Point Positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(11): 1223-1235.

[26] 朱大勇. 亚太地区GPS/GLONASS/Galileo/BDS组合实时精密单点定位性能评估[J]. 测绘地理信息, 2020, 45(3): 96-101.
ZHU Dayong. Performance Evaluation of Real-Time Precise Point Positioning with GPS/GLONASS/Galileo and BDS Observations over the Asia-Pacific Region[J]. *Journal of Geomatics*, 2020, 45(3): 96-101.

[27] XU G. GPS: Theory, Algorithms and Applications[M]. Berlin: Springer, 2007.

[28] WU Z Y, WANG Q X, YU Z H, et al. Modeling and Performance Assessment of Precise Point Positioning with Multi-frequency GNSS Signals[J]. *Measurement*, 2022, 201: 111687.

[29] TAKASU T, YASUDA A. Development of the Low-Cost RTK-GPS Receiver with an Open Source Program Package RTKLIB[C]//International Symposium on GPS/GNSS, Seogwiposi Jungmun-dong, Korea, 2009.

[30] SU M K, ZHENG J S, YANG Y X, et al. A New Multipath Mitigation Method Based on Adaptive Thresholding Wavelet Denoising and Double Reference Shift Strategy[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(2): 40.

[31] 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.

[32] CHANG G B, CHEN C, YANG Y X, et al. Tikhonov Regularization Based Modeling and Sidereal Filtering Mitigation of GNSS Multipath Errors[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11): 1801.

[33] HU C, WANG Z Y, RAO P W, et al. One-Step Correction Strategy for BDS-2/BDS-3 Satellite Observation Code Bias and Multipath Delay[J]. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2021, 56(1): 29-59.

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