

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2024.02.012

## BDS-3 PPP 模糊度固定实现及精度评估

肖正阳<sup>1</sup>, 肖国锐<sup>1,2</sup>, 刘长建<sup>1</sup>, 宋开放<sup>1</sup>, 魏浩鹏<sup>1</sup>, 李沛功<sup>1</sup>

(1. 信息工程大学地理空间信息学院, 郑州 450001;

2. 中国测绘科学研究院, 北京 100039)

**摘要:**精密单点定位(PPP)模糊度固定(AR)能够显著提升精密定位的收敛速度和精度。通过在BDS-2和BDS-3之间添加系统间偏差的方法实现BDS-3的模糊度固定,并基于全球MGEX测站静态、仿动态数据和车载实验数据全面评估了BDS-3模糊度固定的效果。结果表明,相对于浮点解,BDS-3 PPP模糊度固定能够显著提升PPP的精度,在东北天3个方向上静态解算精度提升依次为37.4%、26.2%和20.1%;仿动态解算精度提升依次为38.3%、27.2%和11.1%;车载动态实验BDS-3模糊度固定精度在三维方向上综合提升为40.4%。此外,模糊度固定后,以浮点解稳定后的两倍定位精度为基准,在东北天方向上,静态定位时间提升程度依次为63.5%、64.0%和40.3%;仿动态定位时间提升程度依次为58.7%、56.8%和25.4%;车载实验在三维方向的收敛时间为30.0 min。以上结果证明了所提方法的有效性及其对BDS-3模糊度固定性能的提升。

**关键词:**北斗二号系统;北斗三号系统;系统间偏差;精密单点定位模糊度固定

中图分类号:P228

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2024)02-0122-11

## Implementation of BDS-3 precise point positioning ambiguity resolution and accuracy evaluation

XIAO Zhengyang<sup>1</sup>, XIAO Guorui<sup>1,2</sup>, LIU Changjian<sup>1</sup>, SONG Kaifang<sup>1</sup>, WEI Haopeng<sup>1</sup>, LI Peigong<sup>1</sup>

(1. Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;

2. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Precise point positioning (PPP) ambiguity resolution (AR) can significantly improve the accuracy and convergence speed of precision positioning. The ambiguity resolution of BDS-3 is achieved by adding internal system bias between BDS-2 and BDS-3, and the effect of BDS-3 PPP ambiguity resolution is comprehensively evaluated based on static data, simulated kinematic data from MGEX stations and real-time data from vehicle-borne experiments. The results show that, compared with the float solution, the BDS-3 PPP ambiguity resolution can significantly improve the accuracy and convergence speed of PPP, with the static accuracy improvement of about 37.4%, 26.2%, and 20.1% in the three directions of the east, north and up, respectively. For the simulated kinematic BDS-3 PPP ambiguity resolution the accuracy is improved by about 38.3%, 27.2%, and 11.1%. For real-time data, the accuracy after ambiguity resolution is improved by 40.4% integrated in the 3D direction. In addition, based on twice the positioning accu-

收稿日期:2023-10-20;修订日期:2023-12-23

基金项目:国家自然科学基金(42274045,41904039);河南省自然科学基金(232300421105);中国博士后科学基金面上项目(2023M733285)

作者简介:肖正阳(1999—),男,硕士研究生,主要从事GNSS导航定位方面的研究。

通信作者:肖国锐(1989—),男,博士,副教授,主要从事北斗/多源传感器融合精密定位方面的研究。

racy of the float solution stabilized in the east, north, and up directions after BDS-3 PPP ambiguity resolution, the static positioning time can be improved by 63.5%, 64.0%, and 40.3%, respectively and the simulated kinematic positioning time can be improved 58.7%, 56.8% and 25.4%, respectively and the convergence time of the vehicle-borne experiment in the 3D direction is 30.0 min. The above results prove the effectiveness of the proposed method and the improvement of PPP ambiguity resolution.

**Key words:** BDS-2; BDS-3; Internal system bias (ISB); Precise point positioning ambiguity resolution (PPP AR)

## 0 引言

北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)是我国独立自主研制的全球卫星导航系统,依照“先区域后全球”的“三步走”战略,分为北斗导航定位试验系统(BDS-1)、北斗区域导航定位系统(BDS-2)和北斗全球导航定位系统(BDS-3)。BDS-2 包含了 5 颗地球静止轨道(geostationary Earth orbit, GEO)卫星、5 颗倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit, IGSO)卫星和 4 颗地球中圆轨道(medium Earth orbit, MEO)卫星。到目前为止,BDS-3 系统已有 30 颗卫星,其中包括 3 颗 GEO 卫星、3 颗 IGSO 卫星以及 24 颗 MEO 卫星,此外,还有 4 颗 BDS-3 实验卫星(BDS-3e),包括 2 颗 IGSO 和 2 颗 MEO 卫星<sup>[1]</sup>。

早期有关 BDS-3 的研究大多侧重于定轨研究、钟差及观测值质量分析等<sup>[2-5]</sup>,而当前 BDS-3 正常在轨运行卫星达到 30 颗,已具备全球精密单点定位(precise point positioning, PPP)能力。PPP 基于高精度的载波相位和伪距观测值,并使用国际 GNSS 服务组织(international GNSS service, IGS)提供的系列精密轨道和精密钟差产品,实现了单台接收机的高精度定位。但使用单站非差方式不能直接消除接收机端和卫星端的初始相位偏差与硬件延迟,统称为未检校的相位硬件延迟(uncalibrated phase delays, UPD)。由于 UPD 与模糊度无法分离,导致模糊度失去了整数特性。

精密单点定位模糊度固定(precise point positioning ambiguity resolution, PPP AR)基于 UPD 产品,结合模糊度参数的实数解(浮点解)及其方差-协方差矩阵求得模糊度整数解(固定解)。PPP 模糊度固定的重点在于 UPD 与实数模糊度分离,而 UPD 的整周偏差不破坏模糊度整数特性,只要将其小数周偏差(fractional cycle bias, FCB)与模糊度分离,就可恢复其整数特性,实现模糊度固定。当前 FCB 与 PPP 实

数模糊度分离的主要方法一般可分为以下四类<sup>[6]</sup>:星间单差或非差的 FCB 估计<sup>[7-8]</sup>;FCB 和卫星钟差一并估计,常见的方法有整数钟差法<sup>[9-10]</sup>、钟差去耦合模型<sup>[11]</sup>;FCB 和大气延迟等误差项一并估计<sup>[12-13]</sup>;含有 FCB 的非差实数模糊度直接播发给用户端,利用组双差实现模糊度固定<sup>[14]</sup>。谭涵<sup>[15]</sup>和徐宗秋等<sup>[16]</sup>对 BDS 单系统 UPD 进行估计,并进一步开展基于多模 GNSS 试验网(multi-GNSS experiment, MGEX)测站数据的静态 PPP 模糊度固定解实验,结果表明,BDS 定位精度与 GPS 大致相当,模糊度固定后的静态定位精度接近毫米级。Liu 等<sup>[17-18]</sup>提出顾及 BDS-2 与 BDS-3 接收机端 FCB 差异的 BDS-2/3 PPP 固定解算法。Tian 等<sup>[19]</sup>提出基于改进的紧组合模型实现 BDS-2/BDS-3 联合 PPP 模糊度固定,在东北天 3 个方向上的仿动态定位精度提升依次为 54%、42%和 34%,相应的收敛时间提升分别为 32%、24%和 19%。Xu 等<sup>[20]</sup>提出基于 IGSO/MEO 卫星实现 BDS-2 和 BDS-3 的 PPP 模糊度固定,并通过 MGEX 测站的静态、仿动态数据和船载实验综合评估定位精度,结果表明,相对于浮点解的定位精度,在东北天 3 个方向上,静态固定解效果提升依次为 31.3%、18.2%及 13.5%;仿动态固定解效果提升依次为 11.9%、3.8%及 2.2%;船载实验的固定解精度分别达到 3.4 cm、1.5 cm 和 5.5 cm。

此外,已有文献指出,BDS-2 与 BDS-3 之间存在系统间偏差(internal system bias, ISB)<sup>[21]</sup>。Song 等<sup>[22]</sup>分别建立白噪声模型、常数模型和随机游走模型对 BDS-2 和 BDS-3 之间的 ISB 进行估计,结果表明 BDS-2 和 BDS-3 联合 PPP 定位精度提升分别为 17%、16%和 18%。赵文等<sup>[23]</sup>详细研究了引入到 BDS-2 与 BDS-3 联合 PPP 观测模型的 ISB 参数,实验表明该参数可被视为常量且有助于加快 BDS-2/3 PPP 的收敛速度。

本文主要基于 BDS-3 进行 PPP 模糊度固定研

究。通过 BDS-3 PPP 消电离层组合模型,同时利用 MGEX 测站的静态数据及其伪动态处理模式和车载实验,综合分析评估 BDS-3 PPP 浮点解和固定解的定位精度与收敛时间的表现效果。

## 1 BDS-3 PPP 模糊度固定方法

### 1.1 BDS-3 PPP 观测模型

假设单台接收机  $r$  观测卫星  $s$ , 其伪距  $P$  和载波相位  $L$  观测方程可表示为

$$P_{r,i}^s = \rho_r^s + c dt_r - c dt^s + I(i) + T + d_{r,i} - d_i^s + e \quad (1)$$

$$L_{r,i}^s = \rho_r^s + c dt_r - c dt^s - I(i) + T + \lambda_i N_{r,i}^s + b_{r,i} - b_i^s + \epsilon \quad (2)$$

式中,  $i$  表示某一信号频率;  $\rho$  为测站与卫星天线相位中心之间的几何距离;  $c$  表示光速;  $dt_r$ 、 $dt^s$  分别为接收机、卫星的钟差;  $I(i)$  为传播路径上信号频率  $i$  的电离层延迟;  $T$  为对流层延迟;  $d_{r,i}$  和  $d_i^s$  分别表示接收机端和卫星端信号频率  $i$  的伪距硬件延迟;  $b_{r,i}$  和  $b_i^s$  分别表示接收机端和卫星端信号频率  $i$  的载波相位硬件延迟;  $\lambda_i$  表示信号频率  $i$  的载波波长;  $N_{r,i}^s$  为整周相位模糊度;  $e$  和  $\epsilon$  分别表示伪距和载波相位观测值噪声。未在公式中描述的一些误差项, 诸如卫星和接收机的天线相位中心偏差与变化、相位缠绕、地球自转改正及地球固体潮等均默认已被相应模型精确修正。

在 PPP 中最常用的组合是消电离层组合模型 (ionospheric-free PPP, IF PPP), 利用上述 BDS-3 PPP 原始观测模型可以得到

$$P_{r,IF}^s = \rho_r^s + c dt_r - c dt^s + T + d_{r,IF} - d_{IF}^s + e_{IF} \quad (3)$$

$$L_{r,IF}^s = \rho_r^s + c dt_r - c dt^s + T + \lambda_{IF} N_{r,IF}^s + b_{r,IF} - b_{IF}^s + \epsilon_{IF} \quad (4)$$

为了消除 BDS-2 与 BDS-3 之间存在 ISB 的影响, 本文提出一种基于 BDS-2/BDS-3 组合 PPP 的 ISB 模型。在 BDS-2 与 BDS-3 卫星之间建立一个 ISB 参数, 即: 包含 GNSS 时间基准偏差和不同 GNSS 系统相应的接收机伪距硬件延迟偏差。由于 BDS-2 与 BDS-3 均采用北斗时, 该 ISB 参数的引入并不会产生系统时差影响。在使用 IGS 精密钟差产品时, 其所设定的钟差基准会被用户端接收机钟差参数吸收。将 ISB 参数引入到 BDS-3 PPP 消电离层组合模型中, 得到 BDS-2/3 联合 PPP 的观测模型

$$P_{r,IF}^{s,C2} = \rho_r^{s,C2} + c dt_r - c dt^{s,C2} + T^{C2} + d_{r,IF}^{C3} - d_{IF}^{s,C2} + e_{IF}^{C2} + ISB_r \quad (5)$$

$$P_{r,IF}^{s,C3} = \rho_r^{s,C3} + c dt_r - c dt^{s,C3} + T^{C3} + d_{r,IF}^{C3} - d_{IF}^{s,C3} + e_{IF}^{C3} \quad (6)$$

$$L_{r,IF}^{s,C2} = \rho_r^{s,C2} + c dt_r - c dt^{s,C2} + T^{C2} + \lambda_{IF}^{C2} N_{r,IF}^{s,C2} + b_{r,IF}^{C2} - b_{IF}^{s,C2} + d_{r,IF}^{C3} - d_{r,IF}^{C2} + \epsilon_{IF}^{C2} + ISB_r \quad (7)$$

$$L_{r,IF}^{s,C3} = \rho_r^{s,C3} + c dt_r - c dt^{s,C3} + T^{C3} + \lambda_{IF}^{C3} N_{r,IF}^{s,C3} + b_{r,IF}^{C3} - b_{IF}^{s,C3} + d_{r,IF}^{C3} - d_{IF}^{s,C3} + \epsilon_{IF}^{C3} \quad (8)$$

$$ISB_r = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (d_{r,1}^{C2} - d_{r,1}^{C3}) - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (d_{r,2}^{C2} - d_{r,2}^{C3}) \quad (9)$$

式(9)中,  $f$  表示载波频率, 下标 1、2 表示两种组合信号; 上标 C2、C3 分别表示 BDS-2、BDS-3 相应参数。

### 1.2 BDS-3 PPP 模糊度固定

基于引入 ISB 参数得到的 BDS-2/3 联合 PPP 的 IF 观测模型, 对消电离层模糊度参数  $\lambda_{IF} \bar{N}_{r,IF}^s$  重组可得

$$\lambda_{IF} \bar{N}_{r,IF}^s = \frac{c f_2}{f_1^2 - f_2^2} N_w + \frac{c}{f_1 + f_2} \bar{N}_1 \quad (10)$$

分离出载波相位的宽巷整周模糊度 (wide-lane integer ambiguity)  $N_w$  和窄巷浮点模糊度 (narrow-lane float ambiguity)  $\bar{N}_1$  的组合频率波长  $\lambda_w$ 、 $\lambda_n$  计算公式

$$\lambda_w = \frac{c}{f_1 - f_2} \quad (11)$$

$$\lambda_n = \frac{c}{f_1 + f_2} \quad (12)$$

由于宽巷组合波长  $\lambda_w$  较长 (以 B1I 与 B3I 组合信号为例,  $\lambda_w$  约为 102 cm), 通常利用 MW 组合计算

$$L_{MW} = \frac{f_1 L_1 - f_2 L_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} \quad (13)$$

并通过若干历元平滑以削弱伪距噪声等影响, 得到宽巷浮点模糊度  $\bar{N}_w$ , 经正确取整固定后得到宽巷整周值  $N_w$ 。

通过星间单差处理, 得到服务器端的宽巷 FCB 估值, 这里以测站  $i$  为例, 假设接收机观测到两颗卫星  $s_1$ 、 $s_2$ , 则星间单差宽巷浮点模糊度估计值  $\bar{N}_{wi}^{s_1 s_2}$  为

$$\bar{N}_{wi}^{s_1 s_2} = N_{wi}^{s_1 s_2} + b_1^{s_1 s_2} - b_2^{s_1 s_2} - \frac{\lambda_n}{\lambda_w} \left( \frac{d_{r,1}^{s_1 s_2}}{\lambda_1} + \frac{d_{r,2}^{s_1 s_2}}{\lambda_2} \right) \quad (14)$$

式中, 上标  $s_1 s_2$  代表卫星  $s_1$  与卫星  $s_2$  作差处理所得的相应参数, 此时卫星  $s_1$ 、 $s_2$  的宽巷、窄巷相位小数周偏差改正为

$$\phi_w^{s_1 s_2} = \langle \bar{N}_w^{s_1 s_2} - [\bar{N}_w^{s_1 s_2}] \rangle \quad (15)$$

$$\phi_n^{s_1 s_2} = \langle \bar{N}_n^{s_1 s_2} - [\bar{N}_n^{s_1 s_2}] \rangle \quad (16)$$

其中,  $\langle \cdot \rangle$  表示相关历元求平均;  $[\cdot]$  表示四舍五

入取整。

将服务器端的宽巷、窄巷相位小数周偏差改正  $\phi_w^{s_1 s_2}$  和  $\phi_n^{s_1 s_2}$  播发给用户端,实现最终宽巷、窄巷模糊度整数特性的恢复。当且仅当宽巷与窄巷模糊度均被正确固定时,重构 IF 组合 PPP 模糊度,获取固定解  $N_{r,IF}^{s_1 s_2}$

$$N_{r,IF}^{s_1 s_2} = \frac{\lambda_n(N_{mi}^{s_1 s_2} + \phi_n^{s_1 s_2}) + \frac{f_2 \lambda_w N_{wi}^{s_1 s_2}}{f_1 + f_2}}{\lambda_{IF}} \quad (17)$$

另外,窄巷模糊度难以全部被固定,通常还需要采用最小二乘模糊度降相关平差法(least-square ambiguity decorrelation adjustment, LAMBDA)搜索并通过比值检验(Ratio 检验)确定是否得到正确整数解<sup>[24]</sup>。

## 2 BDS-3 PPP 模糊度精度分析

### 2.1 MGEX 测站静态数据分析

选取 10 个 MGEX 测站,其全球地理位置分布情况如图 1 中的红色三角标志所示,其详细信息见表 1,每个测站均可接收 BDS-2 和 BDS-3 卫星系统信号。选择 2021 年年积日(day of year, DOY)第 214 天~218 天连续 5 天的静态观测数据,采样频率

间隔为 30 s,对于具体的测站数据和文件产品的处理策略如表 2 所示。由于使用 IGS 提供的相位产品,要求用户必须使用与 IGS 分析中心一模一样的软件和模型,否则不能达到最优性能,本文实验采用的是团队自估计的小数偏差产品(XFCB)<sup>[25-27]</sup>。此外,本文中静态、仿动态和车载实验的 PPP 收敛标准均被定义为连续 20 个历元的测站东北天方向的坐标精度优于 10 cm。

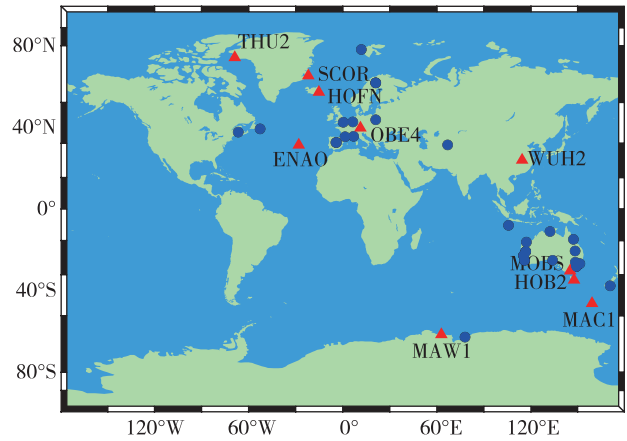


图 1 实验测站地理位置分布

Fig. 1 Geographic distribution of experimental stations

表 1 实验测站信息

Tab. 1 Detailed information on experimental stations

测站	纬度/(°)	经度/(°)	接收机类型	天线类型
ENAO	39.091	-28.026	JAVAD TRE_3	JAVRINGANT_G5T
HOB2	-42.805	147.439	SEPT POLARX5	LEIAR25_R4
HOFN	64.267	-15.198	LEICA GR50	LEIAR25_R4
MAC1	-54.500	158.936	SEPT POLARX5	JAVRINGANT_DM
MAW1	-67.605	62.871	SEPT POLARX5	AOAD/M_T
MOBS	-37.829	144.975	SEPT POLARX5	JAVRINGANT_DM
OBE4	48.085	11.278	SEPT ASTERX4	SEPCHOKE_B3E6
SCOR	70.485	-21.950	SEPT POLARX5	LEIAR20
THU2	76.537	-68.825	SEPT POLARX5	ASH701073.1
WUH2	30.532	114.357	JAVAD TRE_3	JAVRINGANT_G5T

#### 2.1.1 卫星可见数分析

本文首先对所选测站的 BDS-2 与 BDS-3 卫星可用数进行统计。图 2 表明,所选实验测站的 BDS 卫星数量较为充分,在 DOY 214~218 5 天内的

BDS-2 和 BDS-3 卫星可见数达到日均 7.5 颗以上,位于亚太地区范围内的测站,其卫星可见数均在 12 颗以上,最多达到 20 颗。

表 2 BDS-3 PPP 数据处理策略

Tab. 2 Data processing strategies for BDS-3 PPP

解算对象	解算策略
观测值	消电离层组合
信号频率	B1I/B3I
采样间隔	30 s
卫星截止高度角	10°
卫星轨道、钟差	GFZ 精密星历和钟差
PCO、PCV 改正	Igs14.atx
天线相位缠绕	相位缠绕公式修正 <sup>[28]</sup>
卫星差分码偏差	DCB 产品改正
相位偏差产品	自估计 FCB 产品 <sup>[25-27]</sup>
固体潮汐	FES2004.BLQ
地球自转	IGS ERP 产品
相对论效应	模型改正 <sup>[29]</sup>
ISB	常量参数 <sup>[22-23]</sup>
对流层延迟	干分量:Saastamoinen 模型 <sup>[30]</sup> 湿分量:随机游走 <sup>[31-32]</sup>
电离层延迟	消电离层组合
接收机钟差	白噪声估计
参数估计方法	扩展 Kalman 滤波

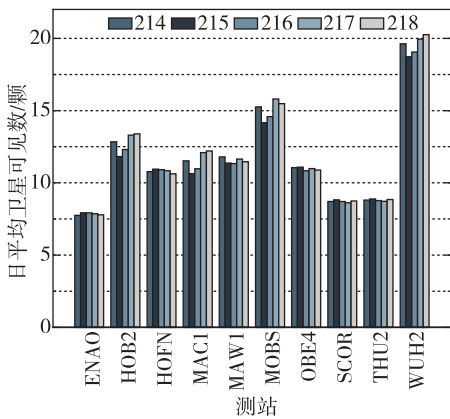


图 2 2021 年年积日第 214~218 天测站日均卫星可用数 (BDS-2+BDS-3)

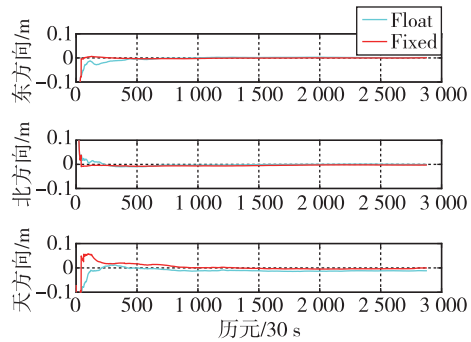
Fig. 2 The daily average number of satellites available during DOY 214-218, 2021 (BDS-2 + BDS-3)

2.1.2 浮点解与固定解坐标精度分析

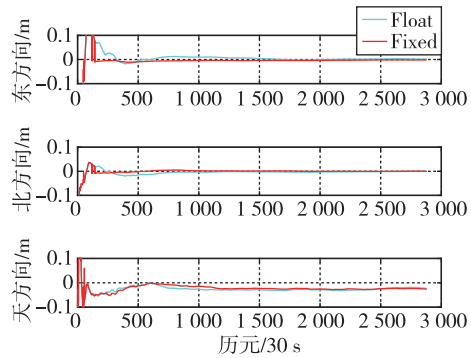
本节选取 OBE4 站和 HOB2 站进行模糊度固定前后的坐标偏差序列分析,然后再通过所选的 10 个测站在 5 个年积日内的解算结果的均方根误差值 (root mean square error, RMSE) 综合评定定位精度。

在结果对比中,以 IGS 周解坐标为基准,绘制测站浮点解(float)与固定解(fixed)的东北天(E、

N、U)3 个方向的坐标偏差序列,如图 3 所示,每个年积日分为 2 880 个历元,采样频率间隔为 30 s。从图中可以发现,首先,各测站数据的固定解结果在 E、N、U 方向上均有所提高,E、N 两个方向的固定效果最为明显,平均定位精度可达到毫米级别,相较而言,U 方向整体的固定效果和平均定位精度略差;其次,在收敛速度上,固定解快于浮点解,模糊度正确固定后,各方向的坐标偏差会迅速收敛在零值附近且此后一直保持稳定。



(a) OBE4 站



(b) HOB2 站

图 3 2021 年年积日第 214 天 OBE4 站和 HOB2 站静态浮点解和固定解的坐标偏差序列

Fig. 3 The static PPP errors of float and fixed solution for OBE4 and HOB2 station on DOY 214, 2021

表 3 统计了所有测站在 5 个年积日内模糊度固定前后平均 RMSE 的对比状况,从统计的实验数据可以看出,在 E、N 和 U 方向上的平均 RMSE 浮点解依次为(1.3, 0.9, 2.6) cm,模糊度固定之后平均提高到(0.8, 0.7, 2.1) cm,相应提升了 37.4%、26.2%以及 20.1%。总体来看,在 E、N、U 3 个方向上,E 方向的模糊度固定提升效果最为明显,而 N 方向的定位精度最优。

表 3 静态 PPP 的浮点解与固定解的平均 RMSE 对比

Tab. 3 Comparison of mean RMSE between float solution and fixed solution for static PPP

测站	浮点解 RMSE/cm			固定解 RMSE/cm			提高百分比/%		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U
ENAO	1.5	1.1	1.4	0.9	1.0	1.2	43.5	14.7	10.6
HOB2	1.5	0.9	3.3	0.8	0.6	3.1	43.4	32.0	7.2
HOFN	0.7	0.7	2.0	0.6	0.5	1.6	22.1	24.9	15.6
MAC1	1.4	1.3	3.4	1.0	0.7	2.9	27.8	45.4	13.4
MAW1	1.0	0.6	2.5	0.5	0.4	1.8	48.6	33.5	26.9
MOBS	1.6	0.5	4.2	0.8	0.4	3.5	48.9	30.3	15.7
OBE4	1.1	0.4	1.3	0.7	0.4	0.9	40.0	9.0	27.5
SCOR	1.2	0.6	2.6	0.7	0.5	1.9	33.3	23.1	29.2
THU2	1.1	1.0	2.5	0.8	0.8	1.9	27.2	28.6	24.9
WUH2	1.5	1.5	2.4	0.9	1.4	1.7	39.5	20.2	30.5
平均值	1.3	0.9	2.6	0.8	0.7	2.1	37.4	26.2	20.1

综合考虑实验结果,BDS-3 静态 PPP 模糊度固定性能在全球范围内的效果良好。

2.1.3 定位精度与收敛时间

为了更加全面、系统地评估 BDS-3 PPP 模糊度固定前后的定位精度与收敛时间表现情况,基于上述已详细分析的 10 个测站(图 1 中红色三角标志的测站),再增添 30 个测站(图 1 中蓝色圆形标志的测站)。同时,在 2021 年年积日第 214 天~218 天,设置测站观测值每 3 h 初始化一次,共计 1 600 个观测时段的解算数据,按置信度为 50% 进行统计<sup>[33-35]</sup>,处理结果见图 4。从图 4 可以看出:模糊度

固定前后,在 E、N 和 U 3 个方向中,E 方向的定位精度的提升效果最显著,N 方向的定位精度最优,U 方向相对略差。定位精度以各浮点解稳定后的两倍为例,模糊度固定后,定位时间在 E、N、U 3 个方向上的改善程度分别为 63.5%、64.0%和 40.3%。表 4 显示,对于静态 PPP 模糊度固定,在 0.5 h,定位精度为(2.4, 1.4, 4.1) cm,相较浮点解提升为 44.3%、34.6%和 12.6%;在 1 h,定位精度为(0.9, 0.8, 3.0)cm,相较浮点解提升为 65.2%、44.4%和 18.4%。显然,随着时间的增加,定位精度会不断提高,直至保持相对稳定。

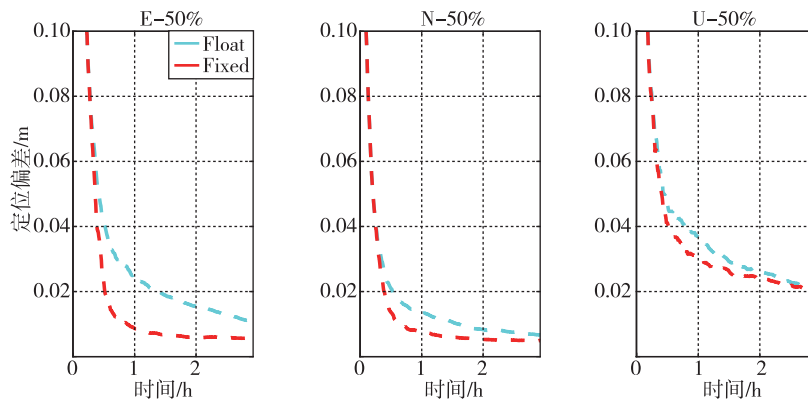


图 4 基于 1 600 个 3 h 观测时段的静态 PPP 模糊度固定前后定位精度与收敛时间的表现状态  
Fig. 4 Static PPP positioning accuracy and convergence time before and after ambiguity resolution based on 1 600 three-hour observation sessions

表4 静态PPP AR定位偏差结果统计

Tab. 4 Positioning deviation result statistic for static PPP AR

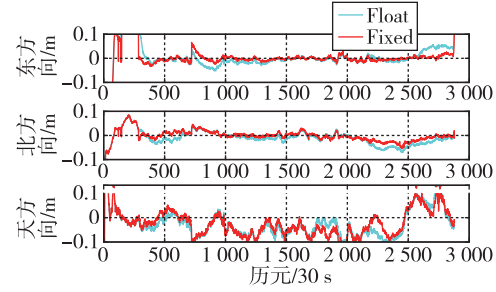
解算模式	时间/h	定位精度/cm			提高百分比/%		
		E	N	U	E	N	U
固定解	0.5	2.4	1.4	4.1	44.3	34.6	12.6
	1.0	0.9	0.8	3.0	65.2	44.4	18.4
	2.0	0.6	0.5	2.4	62.7	36.2	8.3
浮点解	0.5	4.2	2.1	4.7	—	—	—
	1.0	2.5	1.4	3.7	—	—	—
	2.0	1.5	0.8	2.6	—	—	—

注：“—”符号表示无提升效果(下同)。

2.2 仿动态实验数据分析

基于上述MGEX测站静态观测数据,进行仿动态实验数据处理。在kinematic-PPP试验中,测站坐标逐历元估计,且相邻历元按照随机游走处理,其他处理策略与前文一致。

图5展示的是OBE4站和HOB2站在DOY 214下的仿动态坐标偏差序列,可以看出,在E、N和U 3个方向上,相较于浮点解,固定解整体的坐标偏差值更小,波动程度也更小;在收敛速度上,固



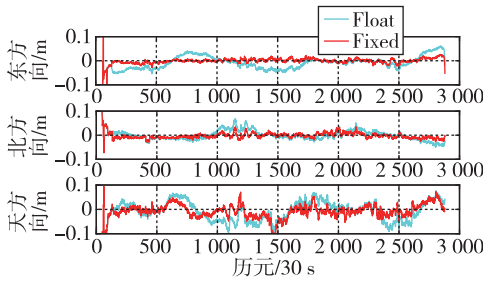
(b) HOB2 站

图5 2021年年积日第214天OBE4站和HOB2站仿动态浮点解和固定解的坐标偏差序列

Fig. 5 Simulated kinematic-PPP errors of float and fixed solution for OBE4 and HOB2 stations on DOY 214, 2021

定解快于浮点解,模糊度一经固定,水平方向的坐标偏差迅速收敛且在零值附近,波动范围约为2~4 cm;高程方向上的动态定位效果不如水平方向,其固定解坐标偏差整体的波动范围均值比浮点解的更加靠近零值线,在部分历元处,高程方向上固定解的坐标偏差超过10 cm,但仍优于浮点解的精度。

在仿动态PPP模糊度固定前后平均RSME的对照表5中可以看出,浮点解在E、N、U 3个方向的平均定位精度为(3.0, 2.2, 5.5)cm,固定之后平均改善为(1.9, 1.6, 4.9)cm,定位精度提高程度依次为38.3%、27.2%、11.1%;在E、N、U 3个方向中,N方向的定位精度最好,E方向的改善效果最佳。模糊度固定之后,水平方向的平均定位精度在1.8 cm左右,最差接近2.6 cm,高程方向固定后的定位精度明显劣于水平方向,其固定后的平均定位精度约为4.9 cm,最差接近7.8 cm。



(a) OBE4 站

表5 仿动态PPP浮点解与固定解的平均RMSE对比

Tab. 5 Comparison of mean RMSE between float solution and fix solution for simulation kinematic-PPP

测站	浮点解 RMSE/cm			固定解 RMSE/cm			提高百分比/%		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U
ENAO	4.0	2.0	7.0	2.6	1.5	6.0	35.2	27.1	13.8
HOB2	3.4	2.7	7.4	2.4	2.1	7.0	34.7	24.5	5.9
HOFN	2.6	2.0	4.2	1.8	1.4	3.4	33.4	31.8	16.6
MAC1	2.8	2.2	5.0	1.6	1.9	4.6	40.7	12.9	8.1
MAW1	2.6	2.1	3.9	1.6	1.4	3.5	39.7	30.9	11.4
MOBS	2.6	1.5	5.2	1.6	1.2	4.7	34.9	15.8	9.4
OBE4	3.2	2.2	4.7	1.7	1.4	4.1	50.1	34.8	14.3
SCOR	3.5	2.5	4.8	2.0	1.2	4.0	44.2	51.6	18.4
THU2	2.4	2.0	4.8	1.5	1.6	4.3	40.9	24.6	10.0
WUH2	3.5	2.9	8.0	2.5	2.4	7.8	28.8	18.3	3.4
平均值	3.0	2.2	5.5	1.9	1.6	4.9	38.3	27.2	11.1

图 6 是基于 1 600 个 3 h 观测时段并取置信度为中值(50%)的情况下,仿动态 PPP 模糊度固定前后的定位精度与收敛时间的表现状态。与静态 PPP 模糊度解算类似的是,在 E、N、U 3 个方向中,E 方向的定位精度的提升效果最显著,N 方向的定位精度最优。定位精度以各浮点解稳定后的两倍为例,模糊度固定前后,定位时间在 E、N、U 3 个方向上的改善程

度分别为 58.7%、56.8%和 25.4%。表 6 显示,对于仿动态 PPP 模糊度固定,在 0.5 h,定位精度为(10.4, 3.4,9.0) cm,相较浮点解提升为 3.7%、12.4%和 5.4%;在 1 h,定位精度为(2.8,1.5,4.9)cm,相较浮点解提升为 49.7%、36.7%和 21.1%。此外,定位精度在 0.5~1 h 内会有较大程度的提升,仿动态模式下的 E 和 N 方向体现得更加显著。

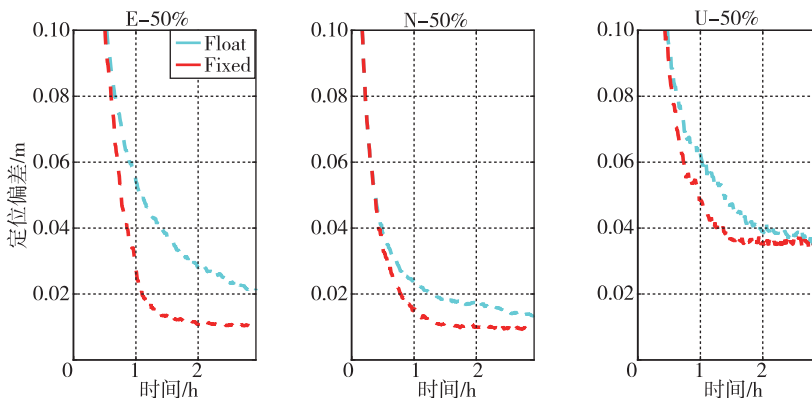


图 6 基于 1 600 个 3 h 观测时段的仿动态 PPP 模糊度固定前后定位精度与收敛时间的表现状态

Fig. 6 Simulated kinematic-PPP positioning accuracy and convergence time before and after ambiguity resolution based on 1 600 three-hour observation sessions

表 6 仿动态 PPP AR 定位偏差结果统计

Tab. 6 Positioning deviation result statistic for simulated kinematic-PPP AR

解算模式	时间/h	定位精度/cm			提高百分比/%		
		E	N	U	E	N	U
固定解	0.5	10.4	3.4	9.0	3.7	12.4	5.4
	1.0	2.8	1.5	4.9	49.7	36.7	21.1
	2.0	1.0	1.0	3.5	62.9	40.6	9.9
浮点解	0.5	10.8	3.9	9.6	—	—	—
	1.0	5.6	2.4	6.2	—	—	—
	2.0	2.8	1.7	3.9	—	—	—

2.3 车载实验数据分析

在基于 MGEX 测站静态数据和仿动态数据实现 BDS-3 模糊度固定的算法基础上,本文进行了实测动态数据的 BDS-3 PPP 模糊度固定实验,于 2021 年 8 月 4 日(2021 年年积日第 216 天)在郑州市高新区通过华测 P5 北斗参考站接收机采集了一组动态数据。图 7(a)显示的是本次车载实验区域,参考经纬度为(113°34'35.04",34°49'22.08"),图 7(b)显示的是实验数据时长约为 2 h(GPS 周内秒从 289 273 到 295 887)的行驶轨迹。通过 Waypoint/Inertial Explorer 高精度 GNSS+INS 事后组合处

理软件(Inertial Explorer, IE)解算 NovAtel SPAN ISA-100C 数据得到本次车载动态实验的参考真值。

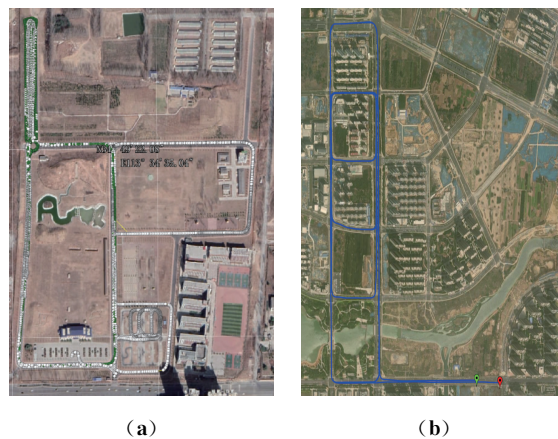


图 7 实测区域俯视图(a)和实验数据轨迹图(b)  
Fig. 7 Overhead view of the measured area(a) and experimental data trajectory plot (b)

在车载数据解算过程中,发现单北斗系统的 PPP 浮点解会在某一历元处产生“阶梯现象”,如图 8(a)所示,在出现该现象的相邻两历元之间参与解算的北斗卫星会减少 1~4 颗或增加 0~4 颗(同时发生),导致浮点解在该历元前后的定位偏差发生分米级的异常跳动,进而使得从该历元及后续历元的模糊度固定错误。考虑到实测数据环境状态的



复杂性,本文选择在四系统(GPS、GLONASS、Galileo和BDS)浮点解的基础上,只对BDS-3做PPP模糊度固定,即:基于四系统卫星观测值解算的浮点解,当进入PPP模糊度固定算法模块时,对于星间单差对的选择限制在BDS-3卫星号范围内。

如图8所示,实测数据的模糊度固定效果在E和U方向较为明显,而N方向的固定解和浮点解比较接近。在三维方向,固定解能始终保持优于20cm的级别,且收敛后的定位精度能保持在10cm附近。表7统计了本次车载实验的BDS-3 PPP模糊度固定前后的定位偏差,在E、N和U方向的固定解精度为(1.7,1.9,7.9)cm,E和U方向的综合提升程度为36.1%和47.7%,而N方向没有提升。综合考虑三维方向上模糊度固定精度由19.7cm提升到10.3cm,综合提升效果为40.4%,其收敛时间为30.0min。

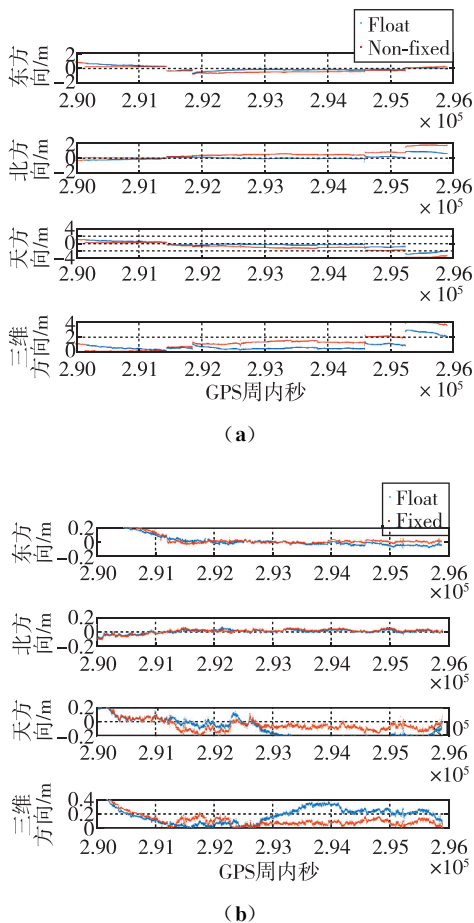


图8 2021年年积日第216天车载实验实际解算的“阶梯现象”(a)和动态浮点解和固定解的坐标偏差序列(b)

Fig. 8 The ladder error (a) and kinematic-PPP errors of float and fixed solution (b) for real-time data from vehicle-borne experiments on DOY 216, 2021

表7 实测动态数据PPP AR定位偏差结果统计

Tab. 7 Positioning deviation result statistics for real-time PPP AR

方向	均值/cm		中值/cm		综合提升/%
	Float	Fixed	Float	Fixed	
E	12.2	11.9	4.1	1.7	36.1
N	4.8	5.6	1.5	1.9	—
U	17.1	10.3	16.8	7.9	47.7
3D	25.5	19.7	21.5	10.3	40.4

### 3 结论

当前BDS-3系统已经全面建成并实施应用,已具备全球PPP能力。本文通过在BDS-2和BDS-3之间添加ISB的方法,以实现BDS-3的PPP模糊度固定,同时基于全球MGEX测站静态数据、仿动态数据和车载实测数据,评估BDS-3模糊度固定的效果。

实验结果表明,相对于模糊度浮点解,固定解在E、N、U方向上静态平均精度由(1.3,0.9,2.6)cm提升至(0.8,0.7,2.1)cm,提升程度依次约为37.4%、26.2%、20.1%;仿动态平均精度由(3.0,2.2,5.5)cm提升至(1.9,1.6,4.9)cm,提升程度依次约为38.3%、27.2%、11.1%;车载动态实验BDS-3模糊度固定后,定位精度在E、N和U方向达到(1.7,1.9,7.9)cm,在E和U方向上得到显著改善,在三维方向上综合提升为40.4%。

此外,实验以浮点解稳定后的两倍定位精度为基准,模糊度固定后,在东、北、天方向上,静态定位时间提升程度依次为63.5%、64.0%和40.3%;仿动态定位时间提升程度依次为58.7%、56.8%和25.4%;车载实验在三维方向上模糊度固定后的收敛时间可达到30.0min。基于全球MGEX测站的静态数据及其仿动态处理模式和实时车载实验数据,本文对所提出的BDS-3 PPP模糊度固定算法进行了较为全面的评估,结果表明了该方法的有效性。

### 参考文献

- [1] CHEN H, LIU X, JIANG W, et al. Preliminary analysis and evaluation of BDS-2/BDS-3 precise point positioning[J]. Advances in Space Research, 2021, 68(10): 4113-4128.
- [2] LI X, YUAN Y, ZHU Y, et al. Precise orbit determination for BDS3 experimental satellites using iGMAS and

- MGEX tracking networks [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(1): 103-117.
- [3] MAO Y, WANG Q, HU C, et al. Accuracy analysis of BDS-3 experiment satellite broadcast ephemeris [C]// *Proceedings of China Satellite Navigation Conference*. Springer, 2018: 341-354.
- [4] XIE X, GENG T, ZHAO Q, et al. Precise orbit determination for BDS-3 satellites using satellite-ground and inter-satellite link observations [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(2): 1-12.
- [5] 张睿. BDS 精密定轨关键技术研究 [J]. *测绘学报*, 2018, 47(9): 1290.
- ZHANG Rui. Research on key technologies of BDS precise orbit determination [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(9): 1290(in Chinese).
- [6] 潘宗鹏. 实时精密单点定位及模糊度固定 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2015.
- PAN Zongpeng. Real-time precise point positioning and ambiguity resolution [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2015(in Chinese).
- [7] GENG J. Rapid integer ambiguity resolution in GPS precise point positioning [D]. University of Nottingham, UK, 2011.
- [8] 张小红, 李星星. 非差模糊度整数固定解 PPP 新方法及实验 [J]. *武汉大学学报信息科学版*, 2010, 35(6): 657-660.
- ZHANG Xiaohong, LI Xingxing. A new method for zero-differenced integer ambiguity resolution and its application to PPP [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(6): 657-660 (in Chinese).
- [9] LAURICHESSE D, MERCIER F, BERTHIAS J P. Real-time precise GPS constellation orbits and clocks estimation using zero-difference integer ambiguity fixing [C]// *Proceedings of 2009 International Technical Meeting of the Institute of Navigation*. Anaheim, 2009: 664-672.
- [10] LAURICHESSE D, MERCIER F, BERTHIAS J P, et al. Zero-difference ambiguity fixing for spaceborne GPS receivers [C]// *Proceedings of 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*. Savannah, 2008: 758-768.
- [11] COLLINS P, BISNATH S, LAHAYE F, et al. Undifferenced GPS ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing [J]. *Navigation*, 2010, 57(2): 123-135.
- [12] TEUNISSEN P J, ODIJK D, ZHANG B. PPP-RTK: results of CORS network-based PPP with integer ambiguity resolution [J]. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation, Series A*, 2010, 42(4): 223-230.
- [13] 邹璇, 唐卫明, 葛茂荣, 等. 基于非差观测的网络实时动态定位方法及其在连续运行基准站跨网服务中的应用 [J]. *测绘学报*, 2011, 40(S1): 1-5.
- ZOU Xuan, TANG Weiming, GE Maorong, et al. Method of network RTK based on undifferenced observation corrections and its functional realization in cross CORS service [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(S1): 1-5(in Chinese).
- [14] BERTIGER W, DESAI S D, HAINES B, et al. Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data [J]. *Journal of Geodesy*, 2010, 84(5): 327-337.
- [15] 谭涵. BDS-3 精密单点定位模糊度解算及性能评估 [J]. *全球定位系统*, 2022, 47(6): 79-85.
- TAN Han. BDS-3 precise point positioning ambiguity resolution and performance assessment [J]. *GNSS World of China*, 2022, 47(6): 79-85(in Chinese).
- [16] 徐宗秋, 丁新展, 徐彦田, 等. BDS 静态精密单点定位模糊度固定解精度分析 [J]. *测绘科学*, 2019, 44(7): 30-34.
- XU Zongqiu, DING Xinzhan, XU Yantian, et al. Accuracy analysis of BDS static precise point positioning with ambiguity resolution [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(7): 30-34(in Chinese).
- [17] LIU X, CHEN H, JIANG W, et al. Modeling and assessment of GPS/Galileo/BDS precise point positioning with ambiguity resolution [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(22): 2693.
- [18] LIU X, JIANG W, LI Z, et al. Comparison of convergence time and positioning accuracy among BDS, GPS, and BDS/GPS precise point positioning with ambiguity resolution [J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(11): 3489-3504.
- [19] TIAN Y, ZHENG F, GONG X, et al. An improved tightly coupled model for precise point positioning ambiguity resolution with the joint BDS-2 and BDS-3 [J]. *Journal of Geodesy*, 2023, 18(3): 429-442.
- [20] XU Z, YANG N, XU Y, et al. BDS precise point positioning ambiguity resolution with high rate data and its application to seismic displacement and marine surveying [J]. *Earth Science Informatics*, 2021, 14(4): 2331-2346.
- [21] 宋美慧, 柴艳菊, 张宝成. GPS/BDS 系统间偏差特性及其对 PPP 影响分析 [J]. *导航定位学报*, 2020, 8(6): 46-52.
- SONG Meihui, CHAI Yanju, ZHANG Baocheng. Anal-

- ysis of characteristics of inter-system bias between GPS/BDS and its impact on PPP[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2020, 8(6): 46-52(in Chinese).
- [22] SONG Z, CHEN J, WANG B, et al. Analysis and modeling of the inter-system bias between BDS-2 and BDS-3[C]// *Proceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC), Volume II*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2020.
- [23] ZHAO W, CHEN H, GAO Y, et al. Evaluation of inter-system bias between BDS-2 and BDS-3 satellites and its impact on precise point positioning[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(14): 2185.
- [24] TEUNNISSEN P. The least-square ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation[J]. *Journal of Geodesy*, 1995, 70(1): 65-82.
- [25] XIAO G, SUI L, HECK B, et al. Estimating satellite phase fractional cycle biases based on Kalman filter[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(3): 1-12.
- [26] XIAO G, LI P, SUI L, et al. Estimating and assessing Galileo satellite fractional cycle bias for PPP ambiguity resolution[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(1): 1-13.
- [27] XIAO G, LI P, GAO Y, et al. A unified model for multi-frequency PPP ambiguity resolution and test results with Galileo and BeiDou triple-frequency observations[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(2): 116.
- [28] HWU S, LU B, HERNANDEZ J, et al. Effects of antenna pattern on global positioning system carrier phase measurement in space station environment[C]// *Proceedings of 1996 National Technical Meeting of the Institute of Navigation*. Santa Monica, 1996: 723-728.
- [29] XU G. GPS data processing with equivalent observation equations[J]. *GPS Solutions*, 2002(6): 28-33.
- [30] SAASTAMOINEN J. Contributions to the theory of atmospheric refraction [J]. *Bulletin Géodésique*, 1972, 105(1): 279-298.
- [31] 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): 36-47.
- [32] MACMILLAN D. Atmospheric gradients from very long baseline interferometry observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(9): 1041-1044.
- [33] LIN J, QIAO S, XIAO G, et al. Performance evaluation of GPS/Galileo fractional cycle bias products and PPP ambiguity resolution[J]. *Journal of Spatial Science*, 2020, 67(3): 509-522.
- [34] LOU Y, ZHENG F, GU S, et al. Multi-GNSS precise point positioning with raw single-frequency and dual-frequency measurement models[J]. *GPS Solutions*, 2015, 20(4): 849-862.
- [35] XIAO G, SUI L, HECK B, et al. Estimating satellite phase fractional cycle biases based on Kalman filter[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(3): 1-12.

(编辑:孟彬)