

LEO增强的GPS、Galileo、BDS-3非差PPP模糊度固定性能分析

方 婧, 涂 锐, 王培源, 陶琳琳, 左 航

Performance analysis of undifferenced PPP ambiguity resolution with LEO enhanced GPS, Galileo, BDS-3

FANG Jing, TU Rui, WANG Peiyuan, TAO Linlin, and ZUO Hang

引用本文:

方婧, 涂锐, 王培源, 等. LEO增强的GPS、Galileo、BDS-3非差PPP模糊度固定性能分析[J]. 全球定位系统, 2023, 48(4): 99–107. DOI: [10.12265/j.gnss.2023044](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023044)

FANG Jing, TU Rui, WANG Peiyuan, et al. Performance analysis of undifferenced PPP ambiguity resolution with LEO enhanced GPS, Galileo, BDS-3[J]. *Gnss World of China*, 2023, 48(4): 99–107. DOI: [10.12265/j.gnss.2023044](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023044)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023044>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

PPP_AR模糊度固定模式下的PPP性能分析

Performance Analysis of PPP in Mode of PPP_AR

全球定位系统. 2018, 43(3): 100–106

非差FCB估计及其在PPP模糊度固定中的应用

Non-difference FCB estimation and the application in fixed fuzziness of PPP

全球定位系统. 2019, 44(3): 32–37

傅里叶级数拟合LEO轨道误差下的BDS/GPS/LEO 精密单点定位

BDS/GPS/LEO precise point positioning based on fourier series fitting LEO orbit error

全球定位系统. 2021, 46(6): 16–24

遮挡环境下GPS / GLONASS / Galileo组合PPP性能分析

Performance Analysis Joint of GPS / GLONASS / Galileo Precise Point Positioning Under Occlusion Condition

全球定位系统. 2018, 43(6): 8–13

PPP-RTK模糊度快速固定算法研究

Research on fast fixing algorithm of PPP-RTK ambiguity

全球定位系统. 2020, 45(6): 21–26

多系统双频精密单点定位不同模型下性能比较分析

Performance comparison of multi-GNSS and dual-frequency PPP under different models

全球定位系统. 2019, 44(6): 97–103



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

LEO 增强的 GPS、Galileo、BDS-3 非差 PPP 模糊度固定性能分析

方婧^{1,2}, 涂锐^{1,2,3}, 王培源^{1,2}, 陶琳琳^{1,2}, 左航^{1,2}

(1. 中国科学院国家授时中心, 西安 710600; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600)

摘 要: 本文主要研究了 GPS、Galileo、北斗三号 (BeiDou-3 Global Satellite Navigation System, BDS-3) 的未校准相位延迟 (uncalibrated phase delays, UPD) 稳定性以及低地球轨道 (low earth orbit, LEO) 增强的非差精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 模糊度固定。基于全球分布的 126 个测站 2022 年 001—007 共一周的观测数据进行 GPS、Galileo、BDS-3 的 UPD 估计分析。宽巷 UPD 每天作为一组常数估计, 窄巷 UPD 每 15 min 作为一组常数估计。结果表明: 宽巷 UPD 在一周之内具有较好的稳定性, 平均标准差小于 0.05 周; 窄巷 UPD 在一天之内具有较好的稳定性, 平均标准差小于 0.06 周。使用估计的 UPD 产品进行 PPP 模糊度固定并对其性能进行分析, GPS、Galileo、BDS-3 各系统静态 PPP 的平均收敛时间分别由 20.75 min、23.78 min、30.60 min 缩短至 10.69 min、18.27 min、24.80 min; 平均模糊度固定率分别为 90.41%、77.22%、67.21%; 东 (east, E)、北 (north, N)、天顶 (up, U) 三个方向均方根误差 (root mean square error, RMSE) 的平均值分别由 (1.59 cm、0.91 cm、3.30 cm)、(1.58 cm、0.93 cm、3.24 cm)、(1.61 cm、0.98 cm、3.39 cm) 减小至 (0.90 cm、0.89 cm、2.98 cm)、(1.33 cm、0.85 cm、2.90 cm)、(1.47 cm、1.18 cm、2.94 cm)。利用仿真的 LEO 星座观测数据, 研究不同 LEO 卫星数量的增强效果, 当 LEO 可视卫星数量愈多时, 增强效果愈加显著, 当 LEO 可视卫星数量为 10 颗时, GPS、Galileo、BDS-3 各系统的静态 PPP 固定解的平均收敛时间分别由 10.69 min、18.27 min、24.80 min 缩短至 1.53 min、1.71 min、1.94 min; 模糊度固定率分别由 90.41%、77.22%、67.51% 提高至 93.43%、79.99%、72.00%。

关键词: 未校准相位延迟 (UPD); 精密单点定位 (PPP); 模糊度固定; 收敛时间; 低地球轨道 (LEO)

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2023)04-0099-09

0 引 言

精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 技术是继实时动态 (real-time kinematic, RTK) 定位技术和网络 RTK 技术之后的又一次技术革命, 具有单站作业、灵活方便、定位精度高的优点, 改变了以往只能通过差分模式获得高精度定位的局面, 现已广泛应用于科学研究和民用领域中, 例如气象学、GNSS 地震学和精密农业等^[1]。然而, 传统的 PPP 浮点解通常需要 30 min 乃至更长的初始化时间才能达到分米-厘米级的定位精度。为了提高定位精度, 缩短初始化时间, GNSS 非差模糊度固定得到快速发展^[2]。近年

来, 各国学者对 PPP 模糊度固定展开了丰富研究。1999 年, Gabor 等^[3]使用星间单差模型固定星间单差模糊度, 但受限于当时的精密钟差和轨道产品的精度, 并没有成功实现模糊度固定。2008 年, Ge 等^[4]成功估计了星间单差未校准相位延迟 (uncalibrated phase delays, UPD), 并实现了星间单差模糊度固定, 提高了东 (east, E) 方向的定位精度。Collins 等^[5]提出钟差去耦模型, 伪距和载波相位对应的卫星钟差分别由伪距和载波相位确定, 载波相位模糊度不再受伪距硬件延迟的影响从而恢复整数特性, 实现非差模糊度固定, 并在 60 min 水平方向取得了优于 2 cm 的定位精度。2009 年, Geng 等^[6]对 Ge 的方法展开了进一步

的研究,利用最小二乘降相关平差 (least-squares ambiguity decorrelation adjustment, LAMBDA) 成功固定了星间单差窄巷模糊度,相较于浮点解,固定解的三维坐标精度提高了 68.3%. Laurichesse 等^[7]提出了整数钟法,将卫星端 UPD 与卫星钟差合并为一个参数进行估计,成功固定宽巷和窄巷模糊度,并在静态和动态定位模式下均取得厘米级的定位精度. 随着 GNSS 的不断发展,模糊度固定的难点逐渐聚焦在 UPD 的精确估计. 2012 年,张小红等^[8]对宽巷 UPD 估计的方法进行了研究,并通过实验证明卫星端宽巷 UPD 随时间的变化量较小,具有较好的稳定性,且测站数量的增加可以进一步提高宽巷 UPD 的精度和可靠性. 2017 年,李林阳等^[9]提出了基于抗差初值的窄巷 UPD 估计方法,提高了窄巷 UPD 的精度和稳定性. 2019 年,宋保丰等^[10]通过最小二乘法分离接收机端和卫星端 UPD,恢复非差模糊度的整数特性,实现非差模糊度固定,显著提高了 E、北 (north, N)、天顶 (up, U) 三个方向的定位精度. 2021 年, Zhao 等^[11]只使用观测站的数据对 UPD 进行估计,利用估计的 UPD 产品对 GNSS 进行模糊度固定,结果表明,与浮点解相比, E、N、U 三个方向上的静态定位精度分别提高了 24%、21%、18%.

近年来兴起的低地球轨道 (low earth orbit, LEO) 增强是加快 PPP 收敛速度的另一种重要手段. 在相同时间内,和 GPS、Galileo、北斗三号 (BeiDou-3 Global Satellite Navigation System, BDS-3) 卫星相比, LEO 卫星在空中运行的路径弧段更长,而空间几何构型的快速变化可以降低历元之间的相关性,在增强模型强度的同时降低模糊度和位置参数的相关性,从而实现快速模糊度的快速收敛^[12-13]. 为了验证 LEO 卫星对 GNSS 的贡献,诸多学者利用仿真的 LEO 卫星观测数据进行了 LEO 卫星增强的高精度定位实验. 2015 年, Ke 等^[14]发现加入 LEO 卫星可以显著缩短 GPS 的收敛时间,单 GPS PPP 的收敛时间缩短了 51.31%. 2018 年, Ge 等^[15]的结果表明, 66 颗 LEO 卫星组成的星座增强 GNSS (GPS+BDS+Galileo) 可以将 PPP 的收敛时间缩短至 5 min. 2019 年, Li 等^[16]研究了在不同卫星数量的 LEO 星座下增强多 GNSS PPP 的性能,结果表明, LEO 卫星数量越多,收敛时间越短,引入 288 颗极轨 LEO 卫星观测数据,收敛时间由 8.2 min 缩短至 0.8 min. 2020 年, Ge 等^[17]使用由 120、150、180、240 颗 LEO 卫星组成的 LEO 星座对 GPS、Galileo、GLONASS 及 BDS 进行增强,结果表明,在 240 颗 LEO 星座的增强下, GNSS 能在 1 min 之内收敛. 2022 年, Liu 等^[18]设计了 177 和 186 低轨

星座的两种混合配置以增强北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS), 经过 10 min 的静态定位,两个 LEO 星座都将 BDS 的定位精度从分米级提高到优于 5 cm 的精度,分别将收敛时间加快到优于 3.5 min 和 3 min 的速度. 2023 年, Hong 等^[19]使用 LEO 星座对 GNSS 进行增强,研究发现,加入 180 颗 LEO 卫星后, GPS、BDS、GPS+BDS+Galileo+GLONASS 的 PPP 浮点解分别在 1.9 min、1.8 min、1.3 min 内收敛. 以上研究主要集中在 LEO 卫星对 GNSS PPP 浮点解的贡献上,鲜有人研究 LEO 对 GNSS 非差 PPP 模糊度固定的贡献.

本文在给出 LEO 增强的 PPP 观测模型基础上,介绍了 GNSS 的 UPD 估计方法及模糊度固定方法,并对 GPS、Galileo、BDS-3 卫星端 UPD 的稳定性进行了分析,最后验证了基于 UPD 的 PPP 模糊度固定性能和 LEO 增强后的 PPP 模糊度固定性能.

1 LEO 增强的 PPP 模型

LEO 增强 GPS、Galileo、BDS-3 的 PPP 观测模型如式 (1) 所示:

$$\begin{cases} p_{r,i}^S = \rho_r^S + cdt_r - cdt_r^S + T_r^S + I_{r,i}^S + b_{r,i} - b_i^S \\ \quad + \partial m_{r,i}^S + e_{r,i}^S \\ p_{r,i}^L = \rho_r^L + cdt_r - cdt_r^L + T_r^L + I_{r,i}^L + b_{r,i} - b_i^L \\ \quad + \partial m_{r,i}^L + e_{r,i}^L \\ l_{r,i}^S = \rho_r^S + cdt_r - cdt_r^S + T_r^S - I_{r,i}^S + \lambda_i^S (\tilde{N}_{r,i}^S \\ \quad + B_{r,i} - B_i^S) + \partial m_{r,i}^S + \varepsilon_{r,i}^S \\ l_{r,i}^L = \rho_r^L + cdt_r - cdt_r^L + T_r^L - I_{r,i}^L + \lambda_i^L \tilde{N}_{r,i}^L \\ \quad + \partial m_{r,i}^L + \varepsilon_{r,i}^L \end{cases} \quad (1)$$

式中: p 和 l 分别为伪距和载波相位观测值; r 和 i 分别为接收机和频率的标识符; S 为 GPS、Galileo、BDS-3 卫星系统的标识符; L 为卫星系统 LEO 的标识符; c 为光速; ρ 为卫星到接收机的几何距离; dt_r 为接收机钟差; dt_r^S 和 dt_r^L 分别为 GPS、Galileo、BDS-3 和 LEO 的卫星钟差; T 为对流层延迟; I 为电离层延迟; $b_{r,i}$ 为接收机端的伪距硬件延迟; b_i^S 和 b_i^L 分别为 GPS、Galileo、BDS-3 和 LEO 卫星端的伪距硬件延迟; $B_{r,i}$ 和 B_i^S 分别为接收机端和 GPS、Galileo、BDS-3 卫星端的相位硬件延迟; λ_i^S 和 λ_i^L 分别为 GPS、Galileo、BDS-3 和 LEO 卫星的波长; $\tilde{N}_{r,i}^S$ 为 GPS、Galileo、BDS-3 卫星的整周模糊度; $\tilde{N}_{r,i}^L$ 为 LEO 卫星的实数模糊度; $\partial m_{r,i}^S$ 和 $\partial m_{r,i}^L$ 分别为 GPS、Galileo、BDS-3 和 LEO 卫星的多路径误差; $e_{r,i}^S$ 和 $e_{r,i}^L$ 分别为 GPS、Galileo、BDS-3 和 LEO 卫星的伪距观测噪声; $\varepsilon_{r,i}^S$ 和 $\varepsilon_{r,i}^L$ 分别为 GPS、Galileo、BDS-3 和 LEO 卫星的载波相位观测噪声.

其他误差项,如相位中心偏差(phase center offsets, PCO)、相位中心变化(phase center variation, PCV)、相位缠绕、BDS-3卫星引起的码偏差、地球固体潮、海洋潮汐和相对论效应等误差采用现有模型进行改正。

无电离层(ionospheric-free, IF)组合模型是PPP中常用的模型之一,IF组合模型可以削弱或消除伪距和载波相位观测值中电离层延迟的一阶项。在本文所涉及的实验中,GPS的IF组合模型由L1和L2频点上的观测值组成,Galileo的IF组合模型由E1和E5a频点上的观测值组成,BDS-3的IF组合模型由B1和B2频点上的观测值组成,LEO的IF模型由L1和L2频点上的观测值组成。IF组合模型的方程为

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{r,IF}^S = \frac{f_i^2 p_{r,i}^S - f_j^2 p_{r,j}^S}{f_i^2 - f_j^2} = \rho_r^S + c(dt_r - dt^S) \\ \quad + T_r^S + b_{r,IF}^S - b_{IF}^S + e_{r,IF}^S \\ p_{r,IF}^L = \frac{f_i^2 p_{r,i}^L - f_j^2 p_{r,j}^L}{f_i^2 - f_j^2} = \rho_r^L + c(dt_r - dt^L) \\ \quad + T_r^L + b_{r,IF}^L - b_{IF}^L + e_{r,IF}^L \\ l_{r,IF}^S = \frac{f_i^2 l_{r,i}^S - f_j^2 l_{r,j}^S}{f_i^2 - f_j^2} = \rho_r^S + c(dt_r - dt^S) \\ \quad + T_r^S + \lambda_{IF} (\tilde{N}_{r,IF}^S + B_{r,IF}^S - B_{IF}^S) + \varepsilon_{r,IF}^S \\ l_{r,IF}^L = \frac{f_i^2 l_{r,i}^L - f_j^2 l_{r,j}^L}{f_i^2 - f_j^2} = \rho_r^L + c(dt_r - dt^L) \\ \quad + T_r^L + \lambda_{IF} \tilde{N}_{r,IF}^L + \varepsilon_{r,IF}^L \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: i 和 j 为频率的标识符; $b_{r,IF}$ 为IF后接收机端伪距硬件延迟; b_{IF}^S 和 b_{IF}^L 分别为IF后GPS、Galileo、BDS-3和LEO卫星端的伪距硬件延迟; $B_{r,IF}$ 和 B_{IF}^S 分别为IF后接收机端和GPS、Galileo、BDS-3卫星端的相位硬件延迟; λ_{IF} 为IF组合模型观测值的波长; $\tilde{N}_{r,IF}^S$ 为GPS、Galileo、BDS-3卫星IF组合模型观测值的整周模糊度; $\tilde{N}_{r,IF}^L$ 为LEO卫星IF组合模型观测值的实数模糊度,其他符号含义与式(1)相同。

其随机模型采用高度角定权方法,即可以采用最小二乘估计或卡尔曼滤波方法进行参数估计,求解测站位置、接收机钟差、对流层延迟和模糊度参数。

2 GNSS的UPD产品估计方法

UPD是指未校准相位延迟从而导致整周模糊度失去整数特性的小数部分,如果事先确定UPD参数,可以实现PPP模糊度固定,加快PPP收敛,提高定位精度。卫星端的宽巷UPD具有较好的稳定性,每天估计一组UPD参数即可满足定位需求^[20],而窄巷UPD

随时间变化波动较大,通常15 min估计一次^[9]。

在PPP模糊度固定过程中,通常将IF组合模型的模糊度分解为宽巷模糊度和窄巷模糊度进行求解,为

$$\begin{aligned} \tilde{N}_{r,IF}^S &= \left(\frac{cf_j}{f_j^2 - f_i^2} \tilde{N}_{r,WL}^S + \frac{c}{f_i + f_j} \tilde{N}_{r,NL}^S \right) / \lambda_{IF} \\ &= \tilde{N}_{r,NL}^S + \tilde{N}_{r,WL}^S f_j / (f_i - f_j) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\tilde{N}_{r,IF}^S$ 为IF组合模型的实数模糊度; $\tilde{N}_{r,NL}^S$ 和 $\tilde{N}_{r,WL}^S$ 分别为窄巷实数模糊度和宽巷整周模糊度。宽巷模糊度通常采用MW(Melbourne-Wübbena)组合进行求解,为

$$\begin{aligned} \tilde{N}_{r,WL}^S &= \left(\frac{l_{r,i}^S}{\lambda_i} - \frac{l_{r,j}^S}{\lambda_j} \right) - \left(\frac{p_{r,i}^S \lambda_j}{(\lambda_i + \lambda_j)} - \frac{p_{r,j}^S \lambda_i}{(\lambda_i + \lambda_j)} \right) / \lambda_{WL} \\ &= \tilde{N}_{r,WL}^S + d_{r,WL} - d_{WL}^S \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\tilde{N}_{r,WL}^S$ 和 $\tilde{N}_{r,NL}^S$ 分别为宽巷实数模糊度和宽巷模糊度的整数部分; λ_{WL} 为宽巷的波长; $d_{r,WL}$ 和 d_{WL}^S 分别为接收机端和卫星端的UPD。由于伪距观测噪声较大,单个历元观测值得到的MW组合值并不可靠,需要在周跳探测后对连续弧段内各历元的MW组合值进行平滑,减少较大的伪距观测噪声的影响,提高可靠性。利用精确估计的IF组合模型实数模糊度和由式(4)得到的宽巷实数模糊度,通过式(5)获得窄巷实数模糊度

$$\begin{aligned} \tilde{N}_{r,NL}^S &= \tilde{N}_{r,IF}^S - \tilde{N}_{r,WL}^S f_j / (f_i - f_j) \\ &= \tilde{N}_{r,NL}^S + d_{r,NL} - d_{NL}^S \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\tilde{N}_{r,NL}^S$ 为窄巷模糊度的整数部分; $d_{r,NL}$ 和 d_{NL}^S 分别为接收机端和卫星端的UPD。宽巷模糊度和窄巷模糊度可以由相同的方式表示,即将实数模糊度分解为整数模糊度和模糊度的小数部分估计UPD参数

$$\tilde{N}_r^S = \tilde{N}_r^S + d_r - d^S \quad (6)$$

式中: $\tilde{N}_r^S$ 和 $\tilde{N}_r^L$ 分别为实数模糊度和模糊度的整数部分; d_r 和 d^S 分别为接收机端和卫星端的UPD。假设由 m 个测站组成的测网中总共可以观测到 n 个卫星,第 i 个测站可观测到的卫星数为 n_i ($n_i \leq n, i = 1, 2, \dots, r$),由式(6)可建立观测方程求解UPD参数

$$\begin{bmatrix} \tilde{N}_1 \\ \tilde{N}_2 \\ \vdots \\ \tilde{N}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & & R_1 & S_1 \\ & I & R_2 & S_2 \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & I & R_m & S_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{N}_1 \\ \tilde{N}_2 \\ \vdots \\ \tilde{N}_m \\ d_r \\ d_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\tilde{N}_i$ 和 $\tilde{N}_i$ 分别为第 i 个测站的实数模糊度和模糊度的整数部分; d_r 和 d_s 分别为接收机端和卫星端

的 UPD 向量, $\mathbf{d}_r$ 为 $m \times 1$ 维向量, $\mathbf{d}_s$ 为 $n \times 1$ 维向量; $\mathbf{R}_i$ 为第 i 列为 1, 其余元素均为 0 的 $n_i \times n$ 的系数矩阵; $\mathbf{S}_i$ 为每行对应元素为 1 的卫星, 其余元素均为 0 的 $n_i \times n$ 的系数矩阵; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵. 由于式 (7) 中卫星端和接收机端的 UPD 线性相关, 该方程组存在秩亏问题, 通常选取观测到次数最多的卫星作为参考卫星, 固定其 UPD 为 0, 利用最小二乘求解式 (7), 得到卫星端和接收机端的 UPD 参数.

3 PPP 模糊度固定方法

3.1 宽巷模糊度固定

在数据预处理阶段, 剔除粗差并进行周跳探测, 对由式 (4) 得到的宽巷模糊度进行平滑处理, 并利用 UPD 参数对其改正, 得到更准确的宽巷模糊度. 由于宽巷组合波长较长, 因此宽巷 UPD 具有较好的稳定性, 经过几个历元的平滑即可达到较高的精度, 因此可以使用取整法对宽巷模糊度直接固定

$$\tilde{N}_{r, \text{WL}}^s = \text{round}(\tilde{N}_{r, \text{WL}}^s) \quad (8)$$

式中: $\tilde{N}_{r, \text{WL}}^s$ 和 $\tilde{N}_{r, \text{WL}}^s$ 分别为宽巷实数模糊度和宽巷整数模糊度; $\text{round}(\cdot)$ 为取整函数.

3.2 窄巷模糊度固定

将固定成功的宽巷整周模糊度和精确估计的 IF 组合模型实数模糊度经式 (5) 计算得到窄巷实数模糊度, 通过 UPD 参数改正, 使窄巷实数模糊度更加准确. 由于窄巷模糊度相关性较强, 故采用最小二乘模糊度降相关平差的方法对窄巷模糊度进行固定.

宽巷模糊度和窄巷模糊度均固定成功后, 可以获得固定后的 IF 组合模型模糊度

$$N_{r, \text{IF}}^s = \left(\frac{c \cdot f_j}{f_i^2 - f_j^2} \tilde{N}_{r, \text{WL}}^s + \frac{c}{f_i + f_j} \tilde{N}_{r, \text{NL}}^s \right) / \lambda_{\text{IF}} \quad (9)$$

式中, $N_{r, \text{IF}}^s$ 为固定后的 IF 组合模型模糊度. 对于 IF 组合模型模糊度固定, 宽巷 UPD 仅用于固定宽巷模糊度, 而窄巷 UPD 则直接参与 IF 组合模型模糊度固定, 因此窄巷 UPD 的精度及可靠性对 PPP 模糊度固定具有重要的影响.

4 实验结果与分析

4.1 数据来源

利用 160 颗 LEO 卫星构成的 LEO 星座仿真测

站的观测数据, 其中包括 70 颗极轨卫星和 90 颗倾斜地球同步轨道卫星 (inclined geo-synchronous orbit, IGSO). 极轨卫星分布在 6 个倾角为 90° 的轨道上, IGSO 分布在 10 个倾角为 60° 的轨道上. 极轨卫星主要分布在南北纬 60° 以上区域, 可满足高纬度和两极地区对定位等服务的需求; IGSO 主要分布在南北纬 $30^\circ \sim 60^\circ$ 的范围, 最高可达南北纬 80° , 实现中高纬度和低纬度地区的覆盖和服务. 本实验中, GPS、Galileo、BDS-3 使用 141 个全球分布的 MGEX (Multi-GNSS Experiment) 测站 2022-01-01—2022-01-07 (年积日 001—007 天) 一周的观测数据, LEO 使用其中 15 个测站的仿真观测数据. 精密产品使用 WHU 分析中心提供的 30 s 精密钟差产品和 15 min 精密轨道产品. 测站参考坐标固定为国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 周解. 图 1 中红色三角形站点表示的 126 个测站用于 GPS、Galileo、BDS-3 卫星 UPD 估计, 黑色圆圈站点表示的 15 个测站用于 GPS、Galileo、BDS-3 非差 PPP 模糊度固定及 LEO 增强的非差 PPP 模糊度固定.

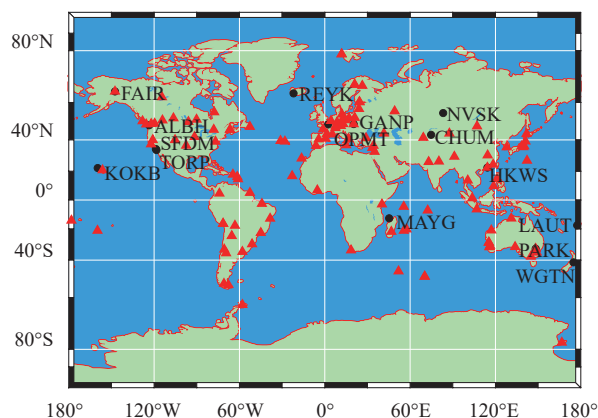


图 1 GPS、Galileo、BDS-3 卫星 UPD 估计、PPP 模糊度固定及 LEO 增强 PPP 模糊度固定测站分布图

4.2 UPD 稳定性分析

对 GPS、Galileo、BDS-3 卫星进行 UPD 估计, 图 2 展示了 2022 年年积日 001—007 天 GPS、Galileo、BDS-3 卫星的宽巷 UPD 时间序列, 为节省篇幅, 每个系统选择 8 颗卫星并在图中以不同的颜色呈现. GPS、Galileo、BDS-3 卫星宽巷 UPD 在一周之内的平均标准差分别小于 0.05 周、0.05 周和 0.04 周, 由此可以得出宽巷 UPD 具有较好的长期稳定性.

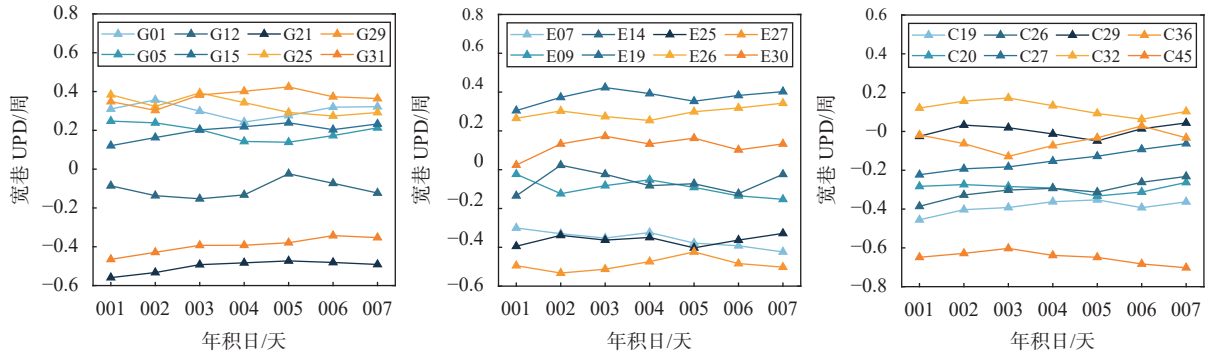


图2 GPS、Galileo、BDS-3部分卫星宽巷UPD时间序列图(2022年年积日001—007)

图3展示了2022年年积日001天GPS、Galileo、BDS-3卫星的窄巷UPD时间序列,每个系统同样只选择8颗卫星并在图中以不同的颜色呈现。GPS、Galileo、BDS-3卫星窄巷UPD在一天之内的平均标准差分别小于0.04周、0.06周和0.06周,由此可以得出窄巷UPD在一天之内具有较好的稳定性。

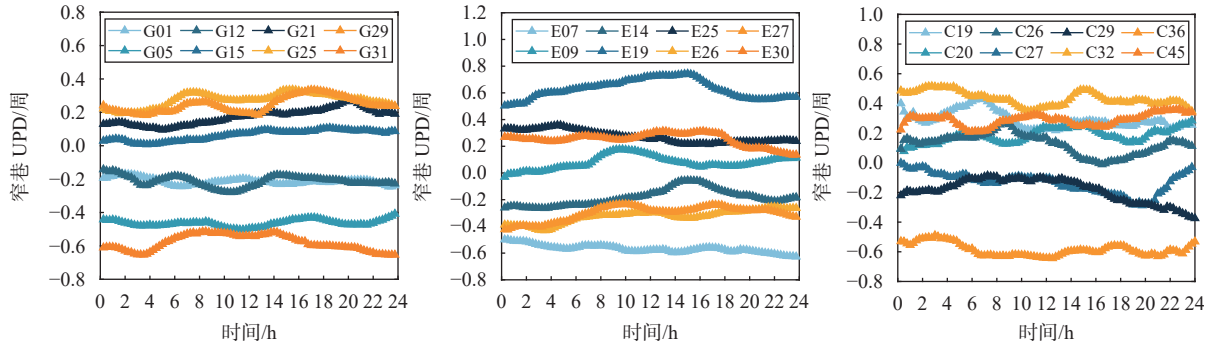


图3 GPS、Galileo、BDS-3部分卫星窄巷UPD时间序列图(2022年年积日001)

4.3 PPP-AR性能分析

本文使用高度角定权的随机模型,截止高度角均设为 7° 。收敛时间定义为连续20个历元在E、N、U方向上的定位偏差均优于10 cm所用的时间。模糊度成功固定定义为模糊度固定通过阈值为2.0的Ratio检验。模糊度固定率是指模糊度成功固定的历元数占总历元数的百分比。

图4为2022年年积日001天前2 h FAIR测站GPS、Galileo、BDS-3静态PPP浮点解和固定解在E、N、U方向上的坐标偏差时间序列图。表1展示了年积日001—007天15个测站静态PPP浮点解与固

定解的平均收敛时间及均方根误差(root mean square error, RMSE)的平均值并记录了固定解的平均模糊度固定率。如表1所示,模糊度固定显著缩短了收敛时间,提高了定位精度,GPS、Galileo、BDS-3的收敛时间分别由20.75 min、23.78 min、30.60 min缩短至10.69 min、18.27 min、24.80 min,GPS、Galileo、BDS-3在E、N、U三个方向的平均RMSE分别由(1.59 cm、0.91 cm、3.30 cm)、(1.58 cm、0.93 cm、3.24 cm)、(1.61 cm、0.98 cm、3.39 cm)减小至(0.90 cm、0.89 cm、2.98 cm)、(1.33 cm、0.85 cm、2.90 cm)、(1.47 cm、1.18 cm、2.94 cm)。

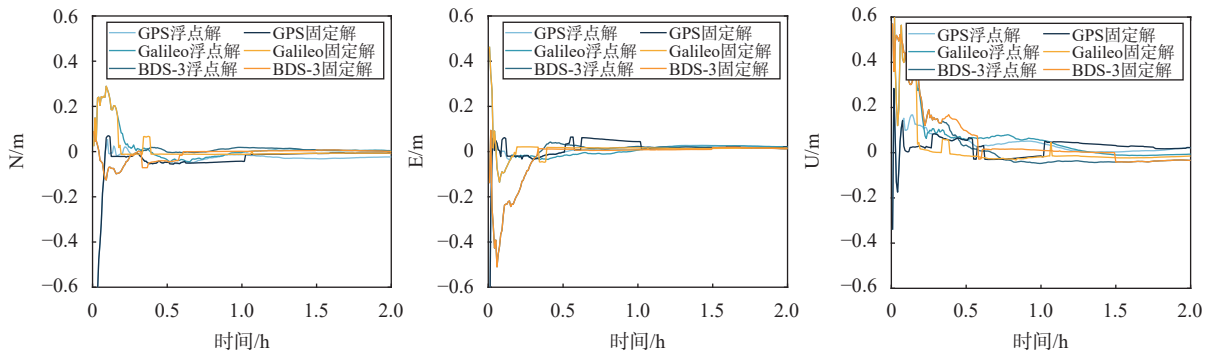


图4 FAIR测站GPS、Galileo、BDS-3静态PPP浮点解与固定解的坐标偏差时间序列图(2022年年积日001)

表 1 GPS、Galileo、BDS-3 静态 PPP 浮点解与固定解收敛时间、RMSE 及固定解模糊度固定率统计

定位系统	浮点解收敛时间/min	固定解收敛时间/min	浮点解RMSE/cm			固定解RMSE/cm			固定率/%
			E方向	N方向	U方向	E方向	N方向	U方向	
GPS	20.75	10.69	1.59	0.91	3.30	0.90	0.89	2.98	90.41
Galileo	23.78	18.27	1.58	0.93	3.24	1.33	0.85	2.90	77.22
BDS-3	30.60	24.80	1.61	0.98	3.39	1.47	1.18	2.94	67.51

图 5 给出了 2022 年年积日 001—007 天测试测站 GPS、Galileo、BDS-3 静态 PPP 固定解的平均收敛

时间和平均历元固定率, 为节省篇幅, 选择 8 个测站呈现。

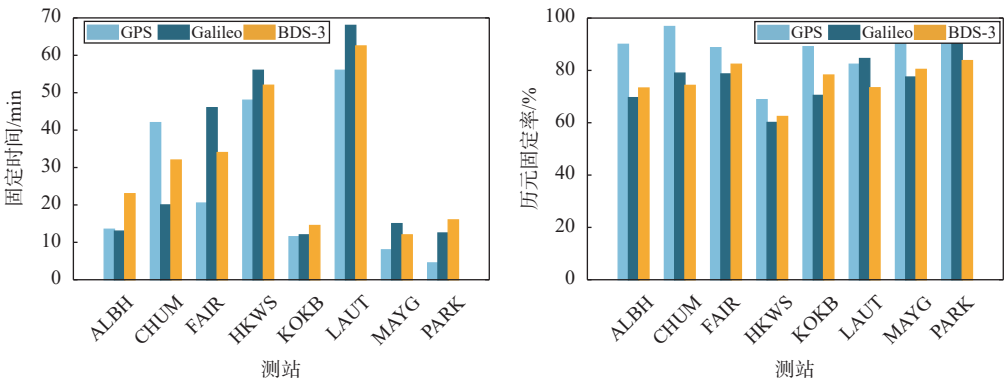
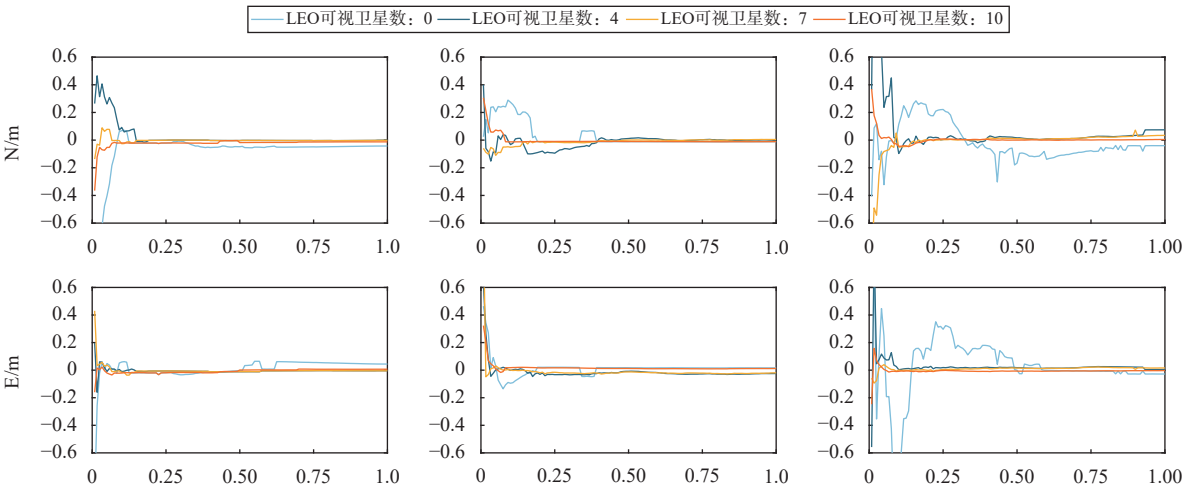


图 5 测试测站 GPS、Galileo、BDS-3 静态 PPP 固定解的平均收敛时间和平均历元固定率统计

4.4 LEO 增强的 PPP-AR 性能分析

LEO 卫星单位时间通过的轨迹比 GNSS 长, 空间几何构型变化快, 这意味着高度角和方位角的变化很大. 这导致定位过程中的历元之间的相关性较弱, 从而增强估计模型. 为了验证 LEO 卫星对 GPS、Galileo、BDS-3 的增强效果, 当 LEO 可视卫星数量不同时, 研究其增强性能. LEO 增强非差 PPP 模糊度固

定的组合定位中, LEO 不进行模糊度固定, GPS、Galileo、BDS-3 进行模糊度固定, 对 LEO 亦使用高度角定权的随机模型, 截止高度角设为 2° . 图 6 为 2022 年年积日 001 天前 1 h FAIR 测站不同 LEO 可视卫星数量 (0 颗、4 颗、7 颗、10 颗) 增强 GPS、Galileo、BDS-3 前后静态 PPP 固定解在 E、N、U 方向上的坐标偏差时间序列图。



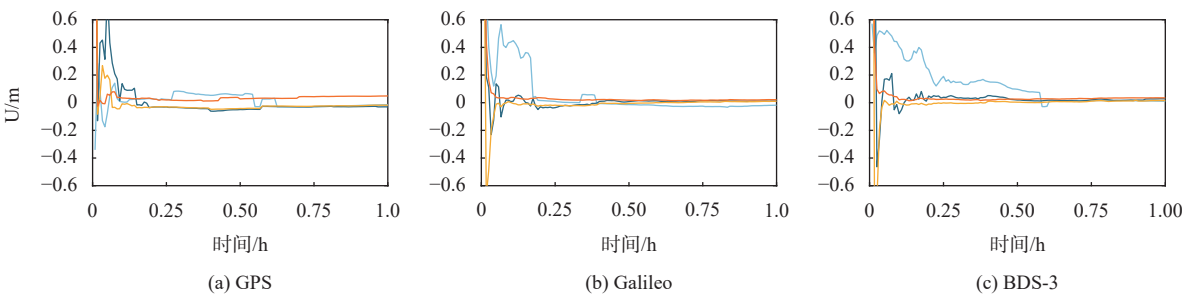


图 6 FAIR 测站不同 LEO 可视卫星数量增强 GPS、Galileo、BDS-3 前后静态 PPP 固定解坐标偏差时间序列图 (2022 年年积日 001)

表 2 及表 3 统计了 2022 年年积日 001—007 天 15 个测站不同 LEO 可视卫星数量增强 GPS、Galileo、BDS-3 前后静态 PPP 固定解的平均收敛时、平均模糊度固定率及平均 RMSE. 可以得出, LEO 增强非差 PPP 模糊度固定可以显著改善模糊度固定性能, 提高 PPP 固定解定位精度, 且随着 LEO 可视卫星数量的

增大, 提升效果愈加明显. 当 LEO 可视卫星数量增加到 10 颗时, GPS、Galileo、BDS-3 静态 PPP 固定解的平均收敛时间分别由 10.69 min、18.27 min、24.80 min 缩短至 1.52 min、1.71 min、1.94 min; 平均模糊度固定成功率分别由 90.41%、77.22%、67.51% 提高至 93.43%、79.99%、72.00%.

表 2 不同 LEO 可视卫星数量增强 GPS、Galileo、BDS-3 前后静态 PPP 固定解平均收敛时间和模糊度固定率统计

定位系统	LEO 可视卫星数: 0		LEO 可视卫星数: 4		LEO 可视卫星数: 7		LEO 可视卫星数: 10	
	收敛时间/min	固定率/%	收敛时间/min	固定率/%	收敛时间/min	固定率/%	收敛时间/min	固定率/%
GPS	10.69	90.41	6.72	91.76	4.00	93.01	1.53	93.43
Galileo	18.27	77.22	8.22	78.50	3.89	79.84	1.71	79.99
BDS-3	24.80	67.51	5.14	68.24	3.56	71.32	1.94	72.00

表 3 不同 LEO 可视卫星数量增强 GPS、Galileo、BDS-3 前后静态 PPP 固定解平均 RMSE 统计

定位系统	LEO 可视卫星数: 0			LEO 可视卫星数: 4			LEO 可视卫星数: 7			LEO 可视卫星数: 10		
	RMSE/cm			RMSE/cm			RMSE/cm			RMSE/cm		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
GPS	0.90	0.89	2.98	0.66	0.62	2.37	0.54	0.53	2.15	0.49	0.47	1.55
Galileo	1.33	0.85	2.90	1.14	0.75	2.52	1.09	0.68	2.01	0.90	0.64	1.93
BDS-3	1.47	1.18	2.94	1.32	1.13	2.46	0.98	1.02	2.21	0.89	0.91	1.59

5 结束语

本文研究了 LEO 增强 GPS、Galileo、BDS-3 非差 PPP 模糊度固定的性能. 基于 MGEX(Multi-GNSS Experiment) 测站的观测数据, 对 GPS、Galileo、BDS-3 卫星端 UPD 进行了估计, 并分析了稳定性, 其宽巷 UPD 在一周之内具有较好的稳定性, 平均标准差均小于 0.05 周, 窄巷 UPD 在一天之内具有较好的稳定性, 平均偏差均小于 0.06 周. 利用 UPD 产品, 实现了 PPP 模糊度固定, 收敛速度显著提高, GPS、Galileo、BDS-3 的平均收敛时间分别由 20.75 min、23.78 min、30.60 min 缩短至 10.69 min、18.27 min、24.80 min,

E、N、U 三个方向的平均 RMSE 分别由 (1.59 cm、0.91 cm、3.30 cm), (1.58 cm、0.93 cm、3.24 cm), (1.61 cm、0.98 cm、3.39 cm) 减小至 (0.90 cm、0.89 cm、2.98 cm), (1.33 cm、0.85 cm、2.90 cm), (1.47 cm、1.18 cm、2.94 cm). 利用仿真的 LEO 观测数据, 实现不同 LEO 可视卫星数量对 GPS、Galileo、BDS-3 的增强, 并对定位精度、收敛速度及固定率进行评估比较. 试验结果表明 LEO 增强 GPS、Galileo、BDS-3 非差 PPP 模糊度固定后定位性能进一步提升, 且当历元 LEO 可视卫星数量更多时, 提升效果更加显著, 当 LEO 可视卫星数量增加到 10 颗时, GPS、Galileo、BDS-3 的平均收敛时间分别由 10.69 min、18.27 min、

24.80 min 缩短至 1.53 min、1.71 min、1.94 min; 平均模糊度固定率分别由 90.41%、77.22%、67.51% 提高至 93.43%、79.99%、72.00%。

本文利用估计的 UPD 产品实现 PPP 模糊度固定, 加快了收敛速度, 提高了定位精度; 同时, LEO 卫星的加入进一步提高了 PPP 固定解的性能, 为快速精密定位提供了技术支撑。但本文未对 LEO 卫星进行 PPP 模糊度固定, 下一步工作将考虑对 LEO 卫星的模糊度进行固定, 期待实现快速实时精密定位。

参考文献

- [1] KOUBA J, HÉROUX P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products[J]. *GPS solutions*, 2001, 5(2): 12-28. DOI: [10.1007/PL00012883](https://doi.org/10.1007/PL00012883)
- [2] HU J H, ZHANG X H, LI P, et al. Multi-GNSS fractional cycle bias products generation for GNSS ambiguity-fixed PPP at Wuhan University[J]. *GPS solutions*, 2020, 24(1): 15. DOI: [10.1007/s10291-019-0929-9](https://doi.org/10.1007/s10291-019-0929-9)
- [3] GABOR M J, NEREM R S. GPS carrier phase ambiguity resolution using satellite-satellite single differences[C]// Proceedings of ION GNSS 12th International Technical Meeting of the Satellite Division, 1999: 1569-1578.
- [4] GE M R, 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. DOI: [10.1007/s00190-007-0187-4](https://doi.org/10.1007/s00190-007-0187-4)
- [5] COLLINS P, LAHAYE F, HÉROUX P, et al. Precise point positioning with ambiguity resolution using the decoupled clock model[C]// Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2008: 16-19.
- [6] GENG J H, TEFERLE F N, SHI C, et al. Ambiguity resolution in precise point positioning with hourly data[J]. *GPS solutions*, 2009(13): 263-270. DOI: [10.1007/s10291-009-0119-2](https://doi.org/10.1007/s10291-009-0119-2)
- [7] LAURICHESSE D, MERCIER F, BERTHIAS J P, et al. Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination[J]. *Navigation*, 2009, 56(2): 135-149. DOI: [10.1002/navi.2009.56.issue-2](https://doi.org/10.1002/navi.2009.56.issue-2)
- [8] 张小红, 李盼, 朱锋. 卫星端宽巷载波相位小数偏差估计方法研究与结果分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(10): 1177-1180.
- [9] 李林阳, 崔阳, 王宇谱, 等. 窄巷 FCB 估计方法改进及时变特性分析[J]. 测绘学报, 2017, 46(01): 34-43.
- [10] 宋保丰, 郝金明, 师一师, 等. 非差 FCB 估计及其在 PPP 模糊度固定中的应用[J]. 全球定位系统, 2019, 44(3): 32-37.
- [11] ZHAO B, XIONG Y L, XU S G, et al. Using only observation station data for PPP ambiguity resolution by UPD estimation [J]. *Advances in space research*, 2021, 67(6): 1805-1815. DOI: [10.1016/j.asr.2020.12.033](https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.12.033)
- [12] LI B F, GE H B, GE M R, et al. LEO enhanced Global Navigation Satellite System (LeGNSS) for real-time precise positioning services[J]. *Advances in space research*, 2019, 63(1): 73-93. DOI: [10.1016/j.asr.2018.08.017](https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.08.017)
- [13] ZHAO Q, PAN S G, GAO C F, et al. BDS/GPS/LEO triple-frequency uncombined precise point positioning and its performance in harsh environments[J]. *Measurement*, 2020 (151): 107216. DOI: [10.1016/j.measurement.2019.107216](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107216)
- [14] KE M X, LV J, CHANG J, et al. Integrating GPS and LEO to accelerate convergence time of precise point positioning[C]// International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), IEEE, 2015: 1-5. DOI: [10.1109/WCSP.2015.7341230](https://doi.org/10.1109/WCSP.2015.7341230)
- [15] GE H B, LI B F, GE M R, et al. Initial Assessment of precise point positioning with LEO Enhanced Global Navigation Satellite Systems (LeGNSS)[J]. *Remote sensing*, 2018, 10(7): 984. DOI: [10.3390/rs10070984](https://doi.org/10.3390/rs10070984)
- [16] LI X X, MA F J, LI X, et al. LEO Constellation-augmented multi-GNSS for rapid PPP convergence[J]. *Journal of geodesy*, 2019, 93(5): 749-764. DOI: [10.1007/s00190-018-1195-2](https://doi.org/10.1007/s00190-018-1195-2)
- [17] GE H B, LI B F, NIE L W, et al. LEO constellation optimization for LEO Enhanced Global Navigation Satellite System (LeGNSS)[J]. *Advances in space research*, 2020, 66(3): 520-532. DOI: [10.1016/j.asr.2020.04.031](https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.031)
- [18] LIU J, HAO J, YANG Y, et al. Design optimization of low earth orbit constellation based on BeiDou Satellite Navigation System precise point positioning[J]. *IET radar, sonar & navigation*, 2022, 16(8): 1241-1252. DOI: [10.1049/rsn2.12257](https://doi.org/10.1049/rsn2.12257)
- [19] HONG J, TU R, ZHANG P F, et al. GNSS rapid precise point positioning enhanced by low Earth orbit satellites[J]. *Satellite navigation*, 2023, 4(1): 1-13. DOI: [10.1186/s43020-023-00100-x](https://doi.org/10.1186/s43020-023-00100-x)
- [20] 张小红, 李盼, 李星星, 等. 宽巷载波相位模糊度小数偏差时变特性分析[J]. 测绘学报, 2013, 42(6): 798-803.

作者简介

方婧 (2000—), 女, 硕士, 研究方向为低轨增强技术。

涂锐 (1985—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为 GNSS 精密定位、测速、时间传递、灾害监测等。

王培源 (1997—), 女, 硕士, 研究方向为 GNSS/加速度计融合定位。

Performance analysis of undifferenced PPP ambiguity resolution with LEO enhanced GPS, Galileo, BDS-3

FANG Jing^{1,2}, TU Rui^{1,2,3}, WANG Peiyuan^{1,2}, TAO Linlin^{1,2}, ZUO Hang^{1,2}

(1. *Nation Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Key Laboratory of Precision Navigation and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China*)

Abstract: This paper focused on the stability of uncalibrated phase delays (UPD) of GPS, Galileo, BDS-3, and the low earth orbit (LEO) augmented undifferenced precise point positioning (PPP) ambiguity resolution. Based on the observation data of 126 global distributed MGEX stations of 7 days from 001 to 007 in 2022 were employed for UPDs estimation of GPS, Galileo, BDS-3. Wide-lane UPDs were estimated as a set of constants every day and narrow-lane UPDs were estimated as a set of constants every 15 minutes. The results showed that the wide-lane UPSs had good stability within one week, and the average standard deviation was less than 0.05 cycles. The narrow-lane UPDs had good stability within 1 day, and the average standard deviation was less than 0.06 cycles. Using the estimated UPDs products for PPP AR and analyzing their performance, the average convergence time of GPS, Galileo and BDS-3 was shortened from 20.75 min, 23.78 min, 30.60 min to 10.69 min, 18.27 min, 24.80 min, respectively, and the average ambiguity fix rates were 90.41%, 77.22% and 67.21%, respectively. The average value of root-mean square error (RMSE) in the east, north and up components decreased from (1.59 cm, 0.91 cm, 3.30 cm), (1.58 cm, 0.93 cm, 3.24 cm), (1.61 cm, 0.98 cm, 3.39 cm) to (0.90 cm, 0.89 cm, 2.98 cm), (1.33 cm, 0.85 cm, 2.90 cm) and (1.47 cm, 1.18 cm, 2.94 cm), respectively. Using the simulated LEO constellation observation data, the enhancement effect of different number of LEO satellites was studied, and the enhancement effect became more significant when the number of LEO visible satellites is more. When the number of LEO visible satellites was 10, the average convergence time of GPS, Galileo and BDS-3 were improved from 10.69 min, 18.27 min, 24.80 min to 1.53 min, 1.71 min, 1.94 min, and average ambiguity fixing rates were improved from 90.41%, 77.22%, 67.51% to 93.43%, 79.99%, 72.00%, respectively.

Keywords: uncalibrated phase delays (UPD); precise point positioning (PPP); ambiguity resolution; convergence time; low earth orbit (LEO)