



低轨增强北斗PPP-RTK定位方法与实验分析

邓志旭, 付元辰, 李 昕

LEO enhanced Beidou PPP-RTK positioning method and experimental analysis

DENG Zhixu, FU Yuanchen, and LI Xin

引用本文:

邓志旭, 付元辰, 李昕. 低轨增强北斗PPP-RTK定位方法与实验分析[J]. *全球定位系统*, 2023, 48(1): 57–63. DOI: [10.12265/j.gnss.2023008](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023008)
DENG Zhixu, FU Yuanchen, LI Xin. LEO enhanced Beidou PPP-RTK positioning method and experimental analysis[J]. *Gnss World of China*, 2023, 48(1): 57–63. DOI: [10.12265/j.gnss.2023008](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023008)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

北斗卫星导航系统动态定位精度测试与分析

Dynamic Positioning Accuracy Test and Analysis of BeiDou Satellite Navigation System

全球定位系统. 2018, 43(1): 43–48

北斗卫星导航系统在河南精准农业中的应用探讨

The Application of BeiDou Satellite Navigation System in Precision Agriculture of Henan

全球定位系统. 2017, 42(3): 94–98

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

北斗卫星导航系统在人工鱼礁中应用的探索

Explore BeiDou Satellite Navigation System in the Application of Artificial Reefs

全球定位系统. 2017, 42(2): 106–109

北斗卫星导航系统在AUV中的应用研究

Study on the Application of BeiDou Satellite Navigation in AUV

全球定位系统. 2018, 43(1): 96–101



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12265/j.gnss.2023008

低轨增强北斗 PPP-RTK 定位方法与实验分析

邓志旭, 付元辰, 李昕

(武汉大学 测绘学院, 武汉 430079)

摘要: 低轨星座具有卫星数目多、几何构型变化快等优势, 有利于精密单点定位 (PPP) 中模糊度参数的快速收敛, 从而提升其收敛速度与定位精度。但由于未能精确消除大气误差的影响, 难以实现瞬时厘米级定位。提出一种低轨增强北斗 PPP-实时动态 (RTK) 方法, 结合高精度大气增强信息与模糊度固定方法 (AR), 进一步改进北斗快速精密定位性能。首先设计了包含 192 颗低轨卫星的极轨星座, 仿真了 22 个地面测站的观测数据, 在估计相位小数偏差与精密大气延迟改正数后, 分别测试了低轨增强北斗 PPP、PPP-AR 与 PPP-RTK 的定位性能。结果表明: 在低轨星座增强下, 可视卫星数目增加 6~8 颗, 22 个测站北斗 PPP 的平均初始化时间由 552.1 s 缩短至 102 s, 提升了 81.52%。模糊度固定后, 初始化时间进一步缩短至 1 min 以内。通过 180 km 地面参考网增强后, 低轨增强北斗 PPP-RTK 可以实现瞬时厘米级定位, 定位精度相较于 PPP 提升 98.5%。将地面参考网扩大至 500 km 后, 低轨增强北斗 PPP-RTK 仍可以实现约 10 s 的快速收敛。

关键词: 低轨增强; 精密单点定位 (PPP)-实时动态 (RTK); 相位小数偏差; 模糊度固定; 北斗卫星导航系统 (BDS)

中图分类号: P228; P228.41

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2023)01-0057-07

0 引言

精密单点定位 (PPP) 是全球卫星导航系统 (GNSS) 的主流定位技术之一, 能够利用单一接收机在全球范围内实现高精度定位^[1-2]。然而, 传统的 PPP 需要数分钟 (~30 min) 才能达到厘米级的定位精度, 且在信号失锁后需消耗几乎相同的时间才能再次收敛, 这也限制了在自动驾驶、精密农业等实时领域的发展与应用。

与中轨道或高轨道的 GNSS 卫星相比, 低轨道地球 (LEO) 卫星具有信号强度较强、空间几何变化较快的优势^[3], 可以使定位过程中的历元间相关性减弱, 缩短收敛时间。仿真结果表明, 低轨增强 GNSS 可将 PPP 收敛时间降低至 5 min^[4-6]。李昕^[7]进一步研究了不同 LEO 星座的低轨增强多系统 GNSS PPP-AR 性能。结果表明, 增加 288-LEO 星座后, 多系统 GNSS PPP 固定解决方案的首次固定时间 (TTFF) 可显著缩短 90%, 但模糊度固定仍需要数十秒, 无法达到瞬时厘米级定位的要求。

PPP-RTK 技术通过参考站网生成精密大气延迟

信息实现快速模糊度固定, 可以显著缩短初始化时间^[8-9]。该技术利用已有的基准站网, 逐站进行 PPP 模糊度固定, 得到精密大气延迟, 并将其播发给用户, 解决了模糊度快速固定的难题。PPP-RTK 技术具有与 PPP 相同的灵活性, 与实时动态 (RTK) 相当的精度, 同时显著减少了通信负担。Teunissen 等^[10]、Li 等^[11]基于不同的方式构建了 PPP-RTK 定位模型, 并验证了其快速模糊度固定的能力。在此基础上, 国内外研究学者开展了关于大气误差建模^[12-14], 多系统 GNSS 融合处理^[15-16]的研究, 以提高 PPP-RTK 的定位性能。结果表明, PPP-RTK 可以实现瞬时厘米级定位, 即数秒内达到稳定的厘米级定位, 但是随着站间距离的增加, 定位性能会严重下降, 仅依赖 GNSS 系统无法实现广域的瞬时厘米级定位。

PPP-RTK 与低轨增强相结合有望实现在稀疏参考站网情况下的瞬时模糊度固定, 从而扩展 PPP-RTK 的覆盖范围, 为海量用户提供广域瞬时厘米级定位服务。因此, 本文设计了一种 LEO 增强的 PPP-RTK 系统, 并且利用 2 种尺度的基准站网研究该模型的定位性能。设计了由 192 颗卫星组成的 LEO 星

收稿日期: 2023-01-18

通信作者: 付元辰 E-mail: fuyuanchen@whu.edu.cn

座, 并且仿真其观测值, 验证 LEO 增强的性能。

1 方法

目前低轨导航星座尚未建设成熟, 需对低轨星座的观测数据进行仿真. 下文将介绍低轨星座数据仿真方法与低轨增强北斗 PPP-RTK 算法。

1.1 低轨星座观测数据仿真方法

考虑到极轨星座在高纬度区域的可视性更好, 与 GNSS 卫星星座具有较好的互补性, 本文基于卫星工具包 (STK) 设计了一种包含 192 颗卫星的低轨极轨星座, 具体星座构型如图 1 所示. 星座采用 Walker 星座构型, 共有 12 个轨道面, 每个轨道面有 16 颗卫星, 轨道高度为 1 000 km, 轨道倾角为 90°。

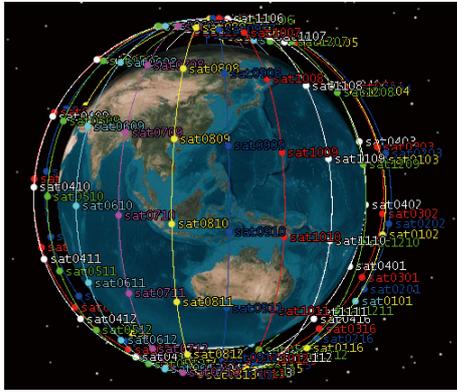


图 1 包含 192 颗卫星的低轨极星座

本文通过计算卫星到接收机的几何距离和各种相关误差生成仿真观测数据. GNSS 卫星的卫星轨道与钟差采用国际 GNSS 服务 (IGS) 的精密轨钟产品, LEO 卫星轨道通过 STK 软件仿真得到, 钟差则通过零均值高斯白噪声进行模拟. 接收机钟差、系统间偏差和对流层湿延迟等参数通过 GNSS 原始观测数据进行 PPP 解算得到. 对流层干延迟、相对论效应、潮汐效应、天线相位中心 (APC) 等误差通过模型仿真得到. 伪距与相位观测噪声采用白噪声 (WN) 模式进行仿真, 噪声方差分别为 2 m 与 2 cm. 测站到接收机的几何距离通过接收机位置与卫星位置计算得到, 在此基础上添加各项误差可得到仿真观测值。

1.2 低轨增强北斗 PPP-RTK 方法

低轨增强北斗 PPP-RTK 系统由服务端与用户端两部分组成. 其服务端基于低轨/北斗观测数据与精密轨道钟差产品生成未检校的相位延迟 (UPD), 辅助参考站进行非差非组合 PPP 模糊度固定以生成精确的电离层与对流层大气改正数. 参考站将电离层与对流层大气改正数传输给用户, 用户端可实现模糊度快速固定, 获取高精度的定位结果。

其中, 低轨增强北斗非差非组合 PPP 观测模型如下式:

$$\begin{cases} p_{r,j}^{s,C} = \mu_r^{s,C} \cdot \mathbf{x} + c(\hat{t}_r^C - \hat{t}_r^{s,C}) + \hat{I}_{r,j}^{s,C} + m^{s,C} T_{\text{wet},r}^s + e_{r,j}^{s,C} \\ p_{r,j}^{s,L} = \mu_r^{s,L} \cdot \mathbf{x} + c(\hat{t}_r^L - \hat{t}_r^{s,L}) + \hat{I}_{r,j}^{s,L} + m^{s,L} T_{\text{wet},r}^s + e_{r,j}^{s,L} \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_{r,j}^{s,C} = \mu_r^{s,C} \cdot \mathbf{x} + c(\hat{t}_r^C - \hat{t}_r^{s,C}) + \hat{I}_{r,j}^{s,C} + m^{s,C} T_{\text{wet},r}^s + \lambda_j^C \hat{N}_{r,j}^{s,C} + \varepsilon_{r,j}^{s,C} \\ I_{r,j}^{s,L} = \mu_r^{s,L} \cdot \mathbf{x} + c(\hat{t}_r^L - \hat{t}_r^{s,L}) + \hat{I}_{r,j}^{s,L} + m^{s,L} T_{\text{wet},r}^s + \lambda_j^L \hat{N}_{r,j}^{s,L} + \varepsilon_{r,j}^{s,L} \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} \hat{t}_r = t_r + \alpha_{12} \cdot b_{r,1} + \beta_{12} \cdot b_{r,2} \\ \hat{I}_{r,1}^s = I_{r,1}^s + \beta_{12} [(b_{r,1} - b_{r,2}) - (b_1^s - b_2^s)] \\ \hat{N}_{r,j}^s = N_{r,j}^s + d_{r,j} - d_j^s \end{cases}. \quad (3)$$

式中: s 、 r 、 j 分别为卫星、接收机、频率; 上标 C、L 分别为北斗和低轨卫星系统; λ_j 为载波相位波长; $p_{r,j}^s$ 和 $I_{r,j}^s$ 分别伪距和相位 OMC 观测值, 其通过观测值与计算值相减得到; μ_r^s 为接收机到卫星的单位矢量; \mathbf{x} 为相对于先验位置的估计坐标修正; \hat{t}_r 代表卫星钟差; α_{12} 和 β_{12} 是 IF 组合的系数, 其中 $\alpha_{12} = \lambda_2^2 / (\lambda_2^2 - \lambda_1^2)$, $\beta_{12} = -\lambda_1^2 / (\lambda_2^2 - \lambda_1^2)$; λ_1 与 λ_2 为 L_1 与 L_2 频段的波长; \hat{t}_r , $\hat{I}_{r,j}^s$, T_{wet}^s 和 $\hat{N}_{r,j}^s$ 分别表示接收机钟差、倾斜电离层延迟、对流层湿延迟和相位模糊度参数; $b_{r,1,2}$ 和 $b_{1,2}^s$ 分别为接收机和卫星端的伪距硬件延迟; $e_{r,j}^s$ 和 $\varepsilon_{r,j}^s$ 分别是伪距和载波相位观测的测量噪声. 值得注意的是, 由于伪距、相位延迟与钟差、电离层以及模糊度参数耦合相关难以分离, 非差非组合模型估计的电离层延迟和模糊度参数将吸收组合形式的伪距与相位偏差, 其中由相位模糊所吸收的组合偏差称为 UPD($d_{r,j}^s$), 其可通过参考站网数据基于最小二乘方法估计得到, 本文所采用的 UPD 产品由开源软件 GREAT-UPD 计算得到^[17]. 在获得精密轨道、钟差和 UPD 改正数后, 非差非组合 PPP 待估参数 \mathbf{X} 为:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{x}, \hat{t}_r^C, \text{ISB}_{L-C}, \hat{I}_{r,j}^s, T_{\text{wet}}^s, N_r^s). \quad (4)$$

式中, ISB_{L-C} 为北斗与低轨卫星的系统间偏差 (ISB). 完成 UPD 改正后, 模糊度参数恢复整数特性, 可以进行非差模糊度固定。

基于非组合 PPP 固定解估计的电离层和对流层延迟可以直接作为大气改正值, 播发给用户. 用户接收到改正数后, 通过内插拟合的方法^[18] 获得所需的大气增强信息. 该增强信息可以通过虚拟观测方程的形式引入上述低轨增强北斗 PPP 模型:

$$\begin{cases} U_{I,j}^{s,C} = \hat{I}_{r,j}^{s,C} - \tilde{I}_{r_1,r_2,\dots,r_n,j}^{s,C} = w_{I,C}, w_{I,C} \sim N(0, \sigma_{w_{I,C}}^2) \\ U_{I,j}^{s,L} = \hat{I}_{r,j}^{s,L} - \tilde{I}_{r_1,r_2,\dots,r_n,j}^{s,L} = w_{I,L}, w_{I,L} \sim N(0, \sigma_{w_{I,L}}^2) \\ U_{I,j}^s = T_{wet,r}^s - \tilde{T}_{wet,r_1,r_2,\dots,r_n}^s = w_T, w_T \sim N(0, \sigma_{w_T}^2) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $U_{I,j}^{s,C}$ 和 $U_{I,j}^{s,L}$ 是电离层与对流层的先验约束; $\tilde{I}_{r_1,r_2,\dots,r_n,j}^{s,C}$ 和 $\tilde{T}_{wet,r_1,r_2,\dots,r_n}^s$ 是由参考网基准站 r_1, r_2, \dots, r_n 提供的电离层和对流层内插改正数; w_I 和 w_T 为零均值 WN, 方差 σ_w^2 为顾及参考网间距的经验值. 值得注意的是, 电离层延迟吸收了硬件延迟, 在用户端需补偿相应误差. 上述具有外部大气约束的 PPP 模型可以有效地削弱大气误差的影响, 加速模糊度的收敛. 将解算得到的精确模糊度参数后, 通过宽巷、窄巷逐级模糊度固定策略进行非差模糊度固定, 其中宽巷模糊度固定后, 将作为外部约束辅助窄巷模糊度.

在数据处理过程中, 考虑到 LEO 卫星具有卫星运动速度快、观测周期短、单颗卫星覆盖面积有限等特点, 需要对低轨卫星的周跳探测与 UPD 估计进行特殊处理. 由于近地轨道卫星的快速运动可能导致历元间电离层延迟发生相当大的变化. 对于低采样率的观测值, 传统的周跳探测方法, 如 Geometry-free (GF) 组合, 效果不佳. 因此, LEO 观测的周跳探测主要依赖于 Melbourne-Wübbena (MW) 组合和验后相位残差判断. 此外, 由于 LEO 卫星观测弧段较短, 且单卫星覆盖区域有限, LEO UPD 估计的有效观测小于 GNSS, 估计得到的 UPD 产品稳定性弱于 GNSS. 本文考虑到 UPD 的稳定时间特征, 适当延长低轨卫星的弧段长度, 以利用更多的观测数据对 UPD 产品进行估计.

2 实验设置与数据处理

选取了全球分布的 22 个 IGS 跟踪站进行观测值仿真与定位测试, 数据采样间隔为 1 s, 测站分布如图 2 所示. 全部测站的观测数据将被用于 PPP 定位测试, 同时, 所有测站的观测数据也将用于 UPD 估计, 为 PPP 模糊度固定提供偏差产品.

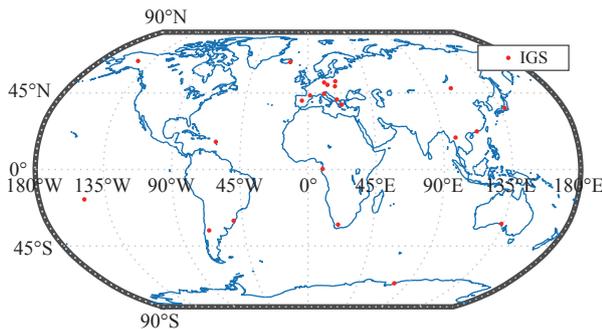
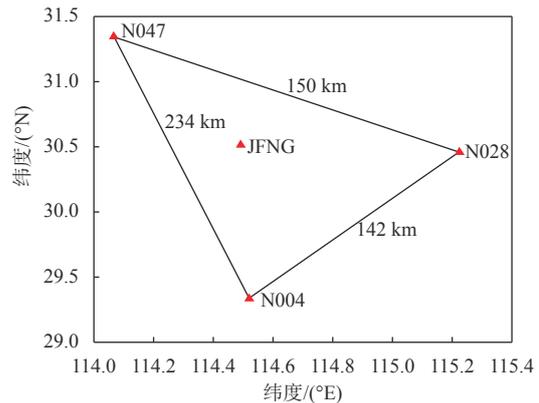
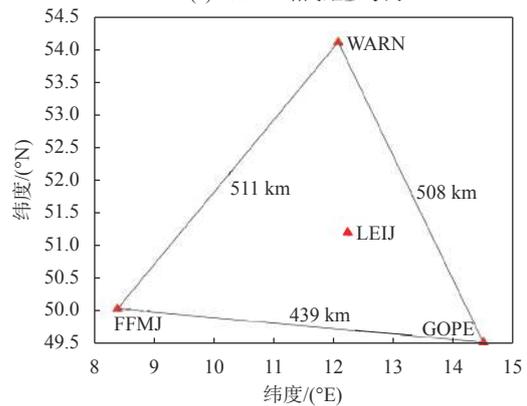


图 2 参与定位测试的 22 个 IGS 测站分布

选择了两种测站间距的参考网开展低轨增强北斗 PPP-RTK 测试, 如图 3 所示. 其中由 N047、N028、N004 测站所形成的参考站网位于中国境内, 平均站间距约 180 km, 为用户站 JFNG 提供精密大气产品. 由 WARN、GOPE、FFMJ 测站组成的参考站网位于欧洲区域, 站间距约在 500 km, 选取 LEIJ 站作为用户站进行低轨增强北斗 PPP-RTK 测试.



(a) 180 km 站间距参考网



(b) 500 km 站间距参考网

图 3 低轨增强北斗 PPP-RTK 参考网与用户站分布

具体的数据处理策略如表 1 所示, 观测数据采用北斗卫星与低轨卫星的非差伪距和载波相位观测值, 截止高度角设置为 7° , 定权方式选择经验的伪距载波噪声比 (100:1) 及高度角定权. 卫星轨道与钟差通过仿真的轨道钟差产品改正, 卫星 APC 误差与变化通过 IGS 发布的天线产品校正, 电离层与对流层误差通过大气产品校正后, 残余误差通过 WN 估计.

表 1 低轨增强北斗 PPP-RTK 处理策略

类别	处理策略
卫星系统	LEO/BDS
估计器	序贯最小二乘
观测数据	仿真的非差伪距和载波相位观测值
信号	LEO: L1/L2 BDS: B1/B3
采用间隔	1 s
截止高度角	7°
卫星轨道	STK轨道
卫星钟差	仿真的精密卫星钟差
卫星天线	IGS天线改正产品
相对论效应	改正
电离层延迟	大气产品改正+残余误差WN估计
对流层延迟	大气产品改正+残余误差WN估计
接收机天线	IGS天线改正产品
地球潮汐	固体潮+极潮改正
接收机位置	静态估计
接收机钟差	WN估计
随机模型	经验的伪距载波噪声比(100:1)及高度角定权

3 实验结果评估

3.1 低轨增强北斗 PPP 测试结果分析

图 4 展示了 JFNG 站 2022 年 11 月 15 日的北斗 PPP 与低轨增强北斗 PPP 的定位时间序列。由图 4 可见,低轨增强北斗 PPP 的定位结果在收敛速度与定位精度上明显优于北斗的定位结果。加入低轨卫星后,可视卫星数目由 18 颗增加到 25 颗左右,位置精度因子(PDOP)值降低到 1 以下,显著改善了卫星定位的几何构型。本文收敛时间定义为水平定位精度在其后连续 100 个历元内优于 10 cm 所需要的时间。JFNG 测站的北斗 PPP 在 420 s 左右收敛,而低轨增强 PPP 的收敛时间仅为 100 s,收敛后可以获得连续稳定的厘米级定位解。

进一步计算了全部测站的北斗 PPP 与低轨增强北斗 PPP 的收敛时间,结果如图 5 所示。可以看到,增加了低轨卫星之后,所有测站的收敛时间均显著减少,部分测站的收敛时间可以缩短至 1 min 以内。表 2 给出了 22 个全球跟踪站的平均收敛时间统计。可以看到,北斗 PPP 的平均收敛时间为 552.1 s。加入低轨卫星后,平均收敛时间为 102 s,相较于北斗的结果,缩短了 81.52%,进一步验证了 LEO 卫星对于缩短 PPP 收敛时间的作用。

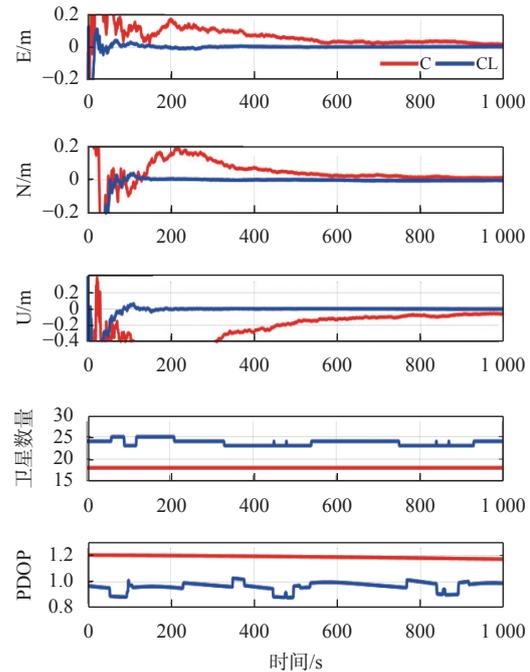


图 4 JFNG 站北斗 PPP 与低轨增强北斗 PPP 的定位时间序列

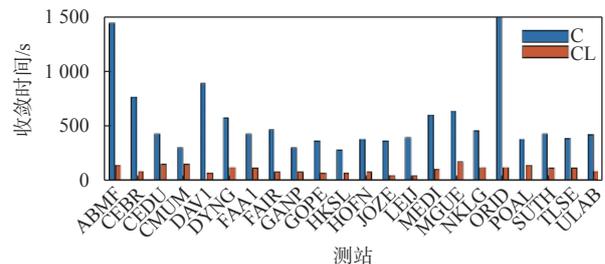


图 5 全部测站北斗 PPP 与低轨增强北斗 PPP 收敛时间

表 2 22 个全球跟踪站 PPP 平均收敛时间

定位算法	平均收敛时间/s
C_PPP	552.1
CL_PPP	102.0

3.2 低轨增强北斗 PPP-RTK 测试结果分析

尽管低轨增强可以显著缩短 PPP 的收敛时间并提升定位精度,约 2 min 的收敛时间仍然不能满足瞬时高精度定位的需求。在此基础上,开展了低轨增强北斗 PPP-RTK 测试。

相位小数偏差的精确估计与分离是实现非差模糊度固定的先决条件。在进行 PPP-RTK 测试之前估计了北斗和低轨卫星的 UPD 产品。图 6 展示了部分北斗与低轨卫星的窄巷(NL)UPD 序列。图中不同的颜色代表不同的卫星。由图 6 可见,BDS 卫星与低轨卫星的 UPD 序列均较为稳定,单天序列变化标准差在 0.1 周以

内. 低轨卫星的 UPD 序列的稳定性明显弱于北斗卫星, 这主要是由于低轨卫星的运行速度快、可视弧段较短, 模糊度频繁初始化, 不利于 UPD 的精确估计.

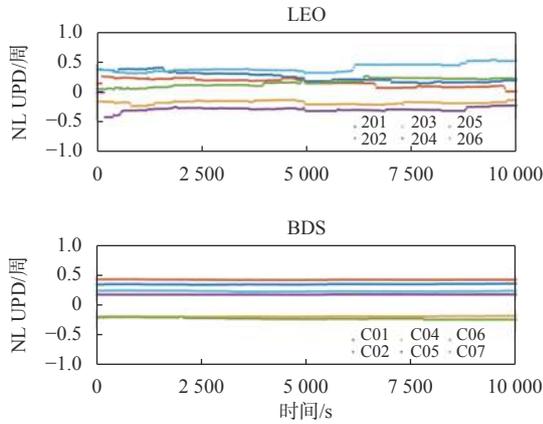


图 6 BDS 与 LEO 的 UPD 估计结果

在获得精确的 UPD 产品后, 在参考网基准站上进行 PPP 固定解算可以提取高精度的大气产品. 用户端接收到 UPD 与大气产品后即可实现 PPP-RTK. 图 7 展示了 JFNG 站北斗 PPP、低轨增强北斗 PPP、低轨增强北斗 PPP-AR、低轨增强北斗 PPP-RTK 的定位时间序列. 由图 7 可见, 低轨增强北斗 PPP-AR 相较于低轨增强 PPP 在定位精度与收敛时间上均有所提升, 而低轨增强北斗 PPP-RTK 展现了最快的收敛速度与最高的定位精度. 低轨增强北斗 PPP-RTK 实现了瞬时厘米级定位, 并且在收敛后可以保持厘米级精度.

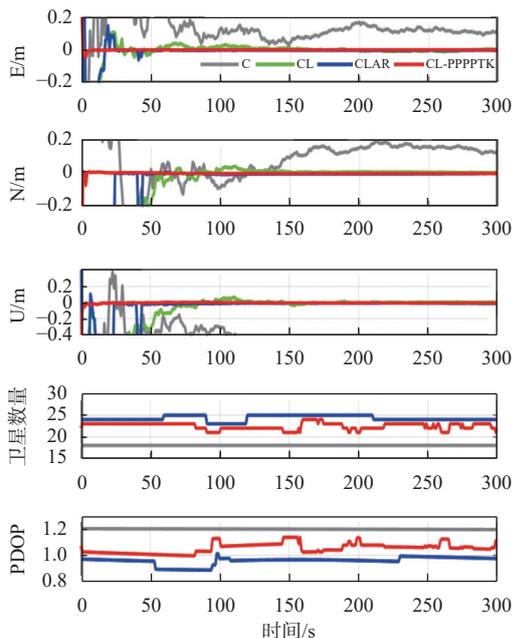


图 7 JFNG 站北斗 PPP、低轨增强北斗 PPP、低轨增强北斗 PPP-AR 和低轨增强北斗 PPP-RTK 的定位时间序列

统计各解算方式的收敛时间和定位精度, 结果如表 3 和图 8 所示. 定位精度为均方根 (RMS) 值统计; 统计结果表明, 低轨增强北斗 PPP-RTK 相较于北斗 PPP、低轨增强北斗 PPP、低轨增强北斗 PPP-AR 收敛时间提升了 99.8%、98.1%、97.7%, 从 464 s 缩短为 1 s; 随着 LEO 卫星和 PPP-RTK 的使用, 定位精度从北斗 PPP 的 0.163 m、0.195 m、0.564 m 提升到低轨增强北斗 PPP-RTK 的 0.003 m、0.002 m、0.009 m, 定位精度提高了 98.5%.

表 3 JFNG 站下不同解算方式的结果

解算方式	收敛时间/s	定位精度/m		
		E	N	U
C_PPP	464	0.163	0.195	0.564
CL_PPP	53	0.070	0.184	0.240
CL_PPP-AR	44	0.059	0.122	0.134
CL_PPP-RTK	1	0.003	0.002	0.009

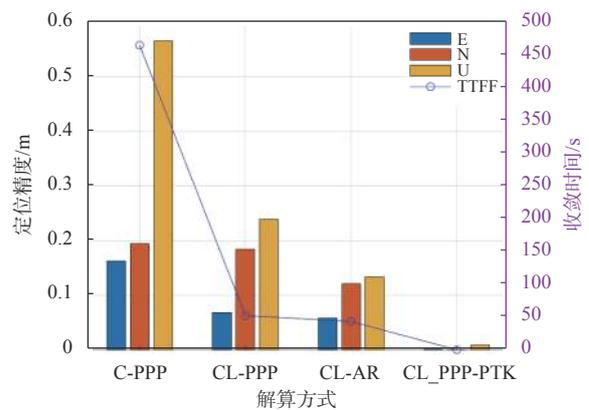


图 8 180 km 区域下不同解算方式的定位精度和收敛时间

将参考站距离扩大至 500 km, 进一步分析低轨增强北斗 PPP-RTK 的定位性能. 图 9 展示了 LEIJ 站北斗 PPP-RTK 与低轨增强北斗 PPP-RTK 的定位时间序列, 红色为北斗 PPP-RTK, 蓝色为低轨增强北斗 PPP-RTK. 可以看到, 加入 LEO 卫星后, PPP-RTK 定位性能改进明显, 即使在 500 km 区域网络范围内, 仅需要数秒就可以完成收敛. 定位精度和收敛时间的统计结果分别如表 4 所示. 北斗 PPP-RTK 在东、北、高分量的定位精度分别为 (0.041、0.028、0.136)m, 加入 LEO 卫星后定位精度分别提高至 (0.006、0.035、0.082) m, 定位精度提升了 19.9%. 收敛时间方面, 加入 LEO 卫星后, 收敛时间从 33 s 缩短至 11 s, 提升了 66.7%, 提升显著.

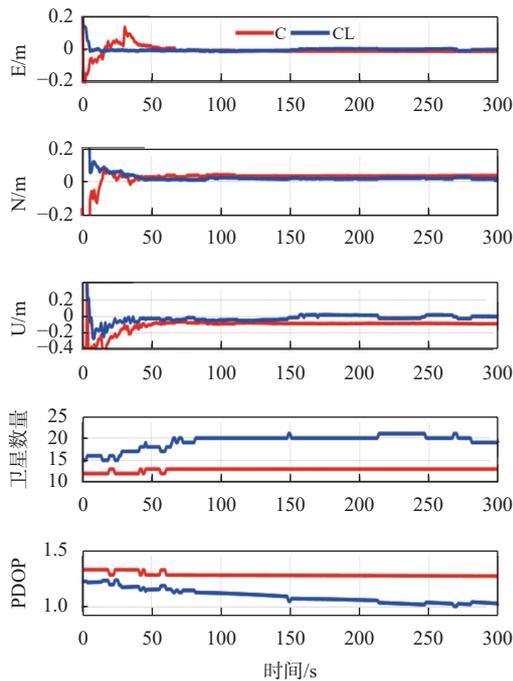


图 9 LEIJ 站北斗 PPP-RTK 与低轨增强北斗 PPP-RTK 的定位时间序列

表 4 LEIJ 站下不同结算方式的结果

解算方式	收敛时间/s	定位精度/m		
		E	N	U
C_PPP-RTK	33	0.041	0.028	0.136
CL_PPP-RTK	11	0.006	0.035	0.082

4 结论

本文提出了低轨增强北斗 PPP-RTK 方法, 结合低轨增强和 PPP-RTK 的优点, 以提升北斗快速精密定位能力. 设计了 192 颗卫星的低轨星座, 仿真对应的观测数据并且进行定位试验. 利用多尺度区域网络研究了低轨增强北斗 PPP-RTK 在收敛速度和定位精度方面的定位性能.

基于上述仿真观测数据, 测试了北斗 PPP 与低轨增强北斗 PPP 的定位效果. 结果表明, 加入低轨卫星后, 可视卫星数增加 6~8 颗, PPP 的平均收敛时间从 552.1 s 缩短至 102 s, 提升约 81.2%. 模糊度固定后, 可进一步缩短收敛时间并提升定位精度. 而低轨增强北斗 PPP-RTK 的定位性能最优, 在 180 km 范围的区域网增强下, 低轨增强北斗 PPP-RTK 可以实现瞬时收敛, 并且在收敛后可以保持厘米级精度. 将区域参考网范围扩展到 500 km 后, 低轨增强北斗 PPP-RTK 仍可以实现约 10 s 的快速收敛.

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 atmospheres*, 1997, 102(B3): 5005-5017. DOI: 10.1029/96JB03860
- [2] KOUBA J, HEROUX P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products[J]. *GPS solutions*, 2001, 5(2): 12-28. DOI: 10.1007/PL00012883
- [3] 马福建. 低轨星座增强GNSS精密定位关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [4] 张小红, 胡家欢, 任晓东. PPP/PPP-RTK 新进展与北斗/GNSS PPP定位性能比较[J]. *测绘学报*, 2020, 49(9): 1084-1100.
- [5] GE H, 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
- [6] KE M X, LV J, CHANG J, et al. Integrating GPS and LEO to accelerate convergence time of precise point positioning[C]// 2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), 2015. DOI: 10.1109/WCSP.2015.7341230
- [7] 李昕. 多频率多星座GNSS快速精密定位关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学.
- [8] 彭文杰. 基于稀疏网的PPP-RTK理论与应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [9] WABBENA G, SCHMITZ M, BAGGE A. PPP-RTK: precise point positioning using state-space representation in RTK networks[C]//Proceedings of the 18th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation, 2005: 2584-2594.
- [10] TEUNISSEN P J G, ODIJK D, ZHANG B. PPP-RTK: results of CORS network-based PPP with integer ambiguity resolution[J]. *Journal of aeronautics, astronautics and aviation, seriesA*, 2010, 42(4): 223-230.
- [11] LI X X, ZHANG X H, GE M R. Regional reference network augmented precise point positioning for instantaneous ambiguity resolution[J]. *Journal of geodesy*, 2010, 85(3): 151-158. DOI: 10.1007/s00190-010-0424-0
- [12] 李星星. GNSS精密单点定位及非差模糊度快速确定方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [13] OLIVRIRA P S, MOREL L, FUND F, et al. Modeling tropospheric wet delays with dense and sparse network configurations for PPP-RTK[J]. *GPS solutions*, 2017, 21(1): 237-250. DOI: 10.1007/s10291-016-0518-0
- [14] ZHANG B C, CHEN Y C, YUAN Y B. PPP-RTK based on

- undifferenced and uncombined observations: theoretical and practical aspects[J]. *Journal of geodesy*, 2019(93): 1011-1024. DOI: [10.1007/s00190-018-1220-5](https://doi.org/10.1007/s00190-018-1220-5)
- [15] LI X X, HUANG J X, LI X, et al. Multi-constellation GNSS PPP instantaneous ambiguity resolution with precise atmospheric corrections augmentation[J]. *GPS solutions*, 2021, 25,(3): 107. DOI: [10.1007/s10291-021-01123-0](https://doi.org/10.1007/s10291-021-01123-0)
- [16] LI X X, WANG B, Li X, et al. Principle and performance of multi-frequency and multi-GNSS PPP-RTK[J]. *Satellite navigation*, 2022, 3(1): 128-138.
- [17] LI X X, HAN X J, LI X, et al. GREAT-UPD: an open-source software for uncalibrated phase delay estimation based on multi-GNSS and multi-frequency observations[J]. *GPS solutions*, 2021, 25(2): 1. DOI: [10.1007/s10291-020-01070-2](https://doi.org/10.1007/s10291-020-01070-2)
- [18] ZHANG X H, REN X D, CHEN J, et al. Investigating GNSS PPP-RTK with external ionospheric constraints[J]. *Satellite navigation*, 2022, 3(1). DOI: [10.1186/s43020-022-00067-1](https://doi.org/10.1186/s43020-022-00067-1)

作者简介

邓志旭 (2002—),男,研究方向为北斗精密定位。

LEO enhanced Beidou PPP-RTK positioning method and experimental analysis

DENG Zhixu, FU Yuanchen, LI Xin

(*School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China*)

Abstract: Low earth orbit (LEO) constellation has the advantages of large number of satellites and rapid change of geometric configuration, which is conducive to the rapid convergence of ambiguity parameters in precise single point positioning (PPP). However, it is difficult to achieve rapid convergence of ambiguity in several seconds or even instantaneous because of the influence of atmospheric delay. In this contribution, a LEO constellation enhanced PPP-RTK method is proposed, which makes full use of the high-precision atmospheric information and ambiguity resolution (AR) method to further improve the positioning performance of Beidou. A polar orbit constellation containing 192 LEO satellites was designed, and the observations of 22 ground stations were simulated. After estimating the UPD and precision atmospheric delay correction, the positioning performance of LEO enhanced PPP, PPP-AR and PPP-RTK are evaluated respectively. The results show that under the enhancement of LEO constellation, the number of visible satellites increases by 4~6, and the average PPP initialization time of 22 stations is shortened from 552.1 s to 102 s, with the improvement of 81.52%. After the ambiguity resolution, the initialization time is further shortened to less than 1 minute. With the regional network augmentation, the LEO enhanced PPP-RTK can achieve a positioning accuracy of centimeter degree, and the positioning accuracy can be improved by 98.5% compared with PPP. Even when the ground reference network is expanded to 500 km, the LEO enhanced PPP-RTK can still achieve rapid convergence of about 10 seconds.

Keywords: LEO constellation augmentation; PPP-RTK; Uncalibrated phase delay; Ambiguity resolution; Beidou navigation satellite system (BDS)