

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.05.015

低轨导航星座增强 BDS 精密单点定位技术验证

邓皓文, 孙 迅, 蒋 林, 季海福

(北京遥测技术研究所, 北京 100076)

摘 要: 首先介绍了低轨增强北斗精密单点定位(PPP)的观测模型、参数估计与数据处理策略。然后对低轨导航增强仿真验证系统及误差仿真配置进行了说明,基于验证系统仿真了全球 20 个监测站的北斗及低轨导航数据,并通过单北斗及低轨增强北斗静态 PPP 试验,给出了低轨增强北斗的高精度定位测试评估结果。结果表明,加入 150 颗低轨卫星观测量后,20 个测站 PPP 精度收敛到 10cm 之内只需约 1min;低轨增强北斗实现静态收敛后,定位精度东方向均值为 1.5cm,北方向均值为 0.3cm,高程方向均值为 2.2cm。相较于北斗单独精密定位,20 个监测站收敛后组合定位精度从 5cm 左右提升到 3cm 左右。加入低轨卫星可大大加快 PPP 收敛速度,提升定位精度,验证了低轨卫星在增强 PPP 精度和收敛速度上的优越性,同时仿真验证系统可支持全链路闭环仿真验证。

关键词: 快速收敛; 导航增强; 精密单点定位; 低轨增强星座

中图分类号: TN966 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2022)05-0136-08

Point Positioning Technology Verification of BDS Enhanced with LEO Navigation Constellation

DENG Hao-wen, SUN Xun, JIANG Lin, JI Hai-fu

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Firstly, the observation model, parameter estimation and data processing strategy of LEO enhanced BDS precise point positioning (PPP) are introduced. Then, the LEO navigation augmentation simulation verification system and error configuration are explained. The BDS and LEO navigation data of 20 monitoring stations around the world are simulated by the built LEO navigation augmentation verification system, and the single BDS and LEO enhanced BDS static PPP experiments verify the LEO enhanced BDS PPP algorithm. The results show that it only takes about 1 minute for the PPP positioning accuracy of the 20 stations to converge to within 10cm after adding LEO observations. The average value of the positioning accuracy is 1.5cm in the east direction, 0.3cm in the north direction, and the mean value in the elevation direction is 2.2cm. After the convergence of the 20 monitoring stations, combined positioning is more precise than BDS alone, the positioning accuracy is improved from about 5cm to about 3cm. The addition of LEO can greatly speed up the PPP convergence speed and improve the positioning accuracy, which verifies the superiority of LEO in enhancing the PPP positioning accuracy and convergence speed. The LEO navigation enhanced simulation verification system can support full-link closed-loop simulation verification.

收稿日期: 2022-02-15; **修订日期:** 2022-04-21

作者简介: 邓皓文(1998-),男,硕士研究生,主要从事卫星导航方面的研究。

通信作者: 孙迅(1974-),男,研究员,主要从事卫星导航及抗干扰技术方面的研究。

Key words: Rapid convergence; Navigation enhancement; Precise point positioning (PPP); LEO enhance constellation

0 引言

低轨(Low Earth Orbit,LEO)卫星星座能够在全球范围内对北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System,BDS)提供信息增强和信号增强,将是我国综合定位导航授时(Positioning,Navigation,and Timing,PNT)体系建设的重要组成部分^[1-2],低轨星座的加入将为卫星导航系统能力的大幅跃升提供有力支撑^[3-5]。精密单点定位(Precise Point Positioning,PPP)是利用国际 GNSS 服务(International GNSS Service,IGS)组织发布的或用户解算得到的精密卫星轨道与精密卫星钟差产品,综合考虑各项误差模型的精确改正,对单台全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)接收机采集的相位和伪距观测值进行非差定位解算,获得高精度坐标的一种定位方法^[6]。非差 PPP 技术可摆脱大范围、长距离测量对地面参考站的依赖,单机作业灵活,节约用户成本。目前,单系统 PPP 达到 cm 级的定位精度需要 20min 甚至更长的首次初始化时间^[7]。

低轨卫星运行速度很快,星座的几何图形结构变化较快,使得定位过程中历元间观测方程的相关性减弱,参数的可估性大大增强,有望从根本上解决载波相位模糊度参数收敛慢的问题,进而缩短 PPP 收敛时间,实现快速精密定位^[8-9]。斯坦福大学泰勒教授在 2016 年的 ION 会议上探讨了低轨星座对全球定位系统(Global Positioning System,GPS)导航的贡献^[10]。美国铱星系统与 GPS 共同研发推出新型卫星授时与定位服务(Satellite Time and Location,STL),已成为 GPS 的备份或补充,既可以独立地导航、定位,也能对 GPS 进行信号增强^[11]。为了分析低轨导航增强星座对 GPS PPP 的效果,文献^[12]采用无电离层模型结合 GPS 和 LEO 卫星进行试验,结果表明,GPS/LEO PPP 算法比单独使用 GPS 的 PPP 算法收敛时间短,定位精度高。对 GPS/LEO PPP 和 GPS/GLONASS PPP 进行了比较分析,在增加相同的可用卫星数量时,GPS/LEO PPP 比 GPS/GLONASS PPP 所需的收敛时间更短,定位精度更高。文献^[13]仿真了含有 120 颗卫星的低轨星座观测数据,评估了 LEO

星座增强 BDS 的性能。将 LEO 数据与 BDS-3 结合后,卫星能见度和位置精度得到了显著改善,PPP 的收敛时间可以从大约 30min 缩短到 1min。文献^[14-15]采用仿真观测值评估不同低轨星座增强 Multi-GNSS PPP 浮点解收敛性能,加入低轨星座后可在数分钟甚至 1min 内实现收敛。文献^[16]探讨了低轨星座增强 Multi-GNSS PPP 三频固定解的性能。总而言之,GNSS PPP 可利用 LEO 卫星几何图形变化快的优势加速定位收敛,有望从根本上解决 PPP 初始化时间长的难题,真正发挥出 PPP 技术的优越性^[8,17]。

目前,大多数文献对 LEO 导航观测数据的仿真方式比较简单且多为数学仿真,但卫星到接收机的几何距离加高斯噪声的方式并不能表示实际的定位情况。本文在上述背景下,构建了 BDS/低轨卫星导航增强半实物仿真验证系统,实现了时空基准统一、误差项精细的 BDS 与低轨星座联合信号仿真与接收,在全星座信号信息模拟与接收测量环境下开展低轨增强 BDS PPP 技术的试验验证,分析了低轨星座增强 BDS PPP 的性能。

1 PPP 观测模型与数据处理

1.1 联合观测模型

对于低轨增强 BDS PPP,采用无电离层模型统一处理 BDS 与低轨星座的伪距与载波相位观测值。通过形成双频无电离层组合观测值,消除伪距和载波测量中一阶电离层延迟。对于接收机 r 观测到的卫星 s ,其伪距 P 与载波相位 L 组合观测值的方程如下^[8]

$$P_{r,IF}^{s,C} = \rho_r^{s,C} + c \cdot (dt_r^C - dt^{s,C}) + T_r^{s,C} + e_{r,IF}^{s,C} \quad (1)$$

$$P_{r,IF}^{s,L} = \rho_r^{s,L} + c \cdot (dt_r^L - dt^{s,L}) + T_r^{s,L} + e_{r,IF}^{s,L} \quad (2)$$

$$L_{r,IF}^{s,C} = \rho_r^{s,C} + c \cdot (dt_r^C - dt^{s,C}) + \quad (3)$$

$$T_r^{s,C} + \lambda_{IF} N_{r,IF}^{s,C} + \epsilon_{r,IF}^{s,C}$$

$$L_{r,IF}^{s,L} = \rho_r^{s,L} + c \cdot (dt_r^L - dt^{s,L}) + \quad (4)$$

$$T_r^{s,L} + \lambda_{IF} N_{r,IF}^{s,L} + \epsilon_{r,IF}^{s,L}$$

式中,上标 C 与 L 分别代表 BDS 以及低轨导航系统(LEO Navigation System,LNS); ρ_r^s 表示卫星到接收机的几何距离; c 为真空中的光速, dt_r^s 和 dt^s 分别表示接收机和卫星钟差; T_r^s 表示倾斜路径对流层延迟; e 表示伪距观测噪声; λ_{IF} 为无电离层组合载波波长; $N_{r,IF}^s$ 为双频无电离层组合模糊度; ϵ 为相位观测

噪声。

1.2 数据处理与参数估计

低轨增强 BDS PPP 算法数据处理流程主要包括:数据预处理、精密星历和卫星时钟内插、误差改正以及滤波解算。数据处理流程如图 1 所示。导航终端除接收常规的 GNSS 导航信号与广播星历外,同时接收低轨卫星导航信号与广播星历以及低轨卫星、

GNSS 卫星的精密轨道与钟差数据。在获取联合观测数据以及增强信息后,首先进行数据预处理与发射时刻卫星星历和时钟内插。在此基础上进行各项误差改正。对系统误差源进行模型化改正,模型化卫星天线和接收机天线相位中心偏移、相对论效应、相位缠绕误差、地球自转、固体潮、海潮、极潮等系统误差源,并对卫星坐标、接收机坐标或者观测值进行改正。

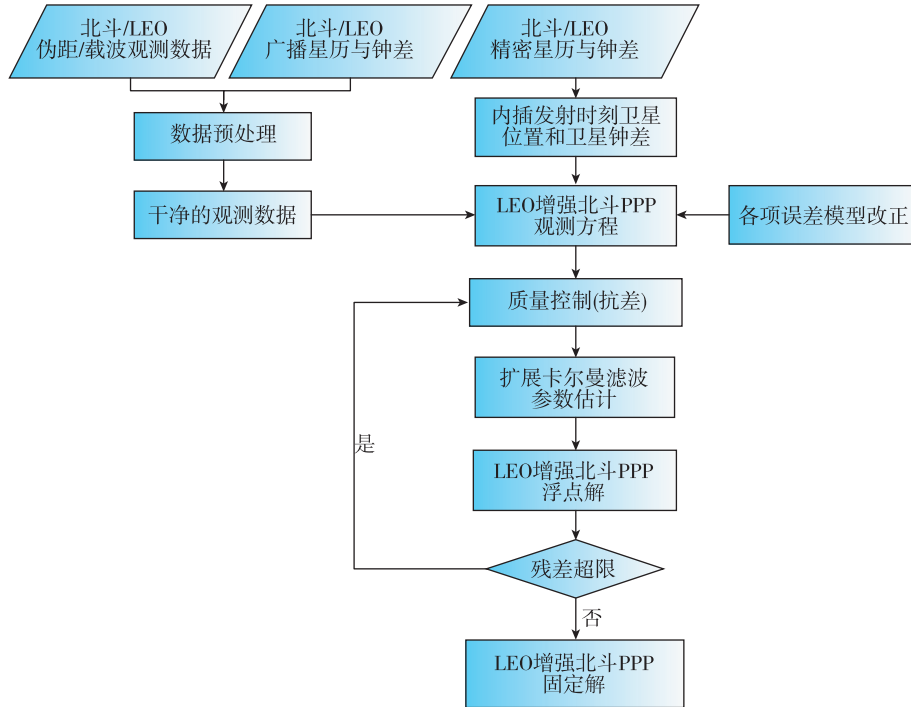


图 1 低轨增强 PPP 数据处理流程

Fig. 1 LEO enhance precise point positioning technology flow

观测模型中的对流层延迟干分量使用模型改正,天顶湿分量延迟作为待估参数进行估计,并使用全球投影函数(Global Mapping Function, GMF)将天顶对流层延迟投影到斜向路径上^[18]。

$$T^s = M^s \cdot VT \quad (5)$$

式中, T^s 为斜向对流层湿分量延迟; M^s 为对流层湿分量投影函数; VT 为天顶对流层湿分量延迟。

假设测站坐标为 (X, Y, Z) , 卫星位置为 (X^s, Y^s, Z^s) , 将观测方程中的几何距离 ρ_i^s 线性展开为

$$\rho = \rho_0 + dx \cdot \Delta x + dy \cdot \Delta y + dz \cdot \Delta z \quad (6)$$

$$dx = \frac{X_0 - X^s}{\rho_0}, dy = \frac{Y_0 - Y^s}{\rho_0}, dz = \frac{Z_0 - Z^s}{\rho_0} \quad (7)$$

式中, ρ_0 为卫星到接收机的近似几何距离; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 为坐标增量; X_0, Y_0, Z_0 为接收机近似坐标。

对无电离层组合进行系统误差改正、天顶对流层延迟投影到斜向方向和几何距离线性展开后,将

观测方程采用矩阵形式表示为式(8)。若某一时刻共观测到 m 个卫星, 状态向量 \mathbf{X} 的表达式如式(9), 其对应的系数矩阵 \mathbf{A} 为式(10)。观测量 \mathbf{L} 是扣除近似距离和系统误差改正数的无电离层伪距和载波相位。

$$\mathbf{V}_{2m} = \mathbf{A}_{2m \times (m+5)} \cdot \mathbf{X}_{m+5} - \mathbf{L}_{2m} \quad (8)$$

$$\mathbf{X} = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, c \Delta t, VT, N_{\text{IF}}^1, N_{\text{IF}}^2, \dots, N_{\text{IF}}^m]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} dx_1 & dy_1 & dz_1 & 1 & M^1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ dx_2 & dy_2 & dz_2 & 1 & M^2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ dx_m & dy_m & dz_m & 1 & M^m & 0 & 0 & \dots & 0 \\ dx_1 & dy_1 & dz_1 & 1 & M^1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ dx_2 & dy_2 & dz_2 & 1 & M^2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ dx_m & dy_m & dz_m & 1 & M^m & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

采用扩展卡尔曼滤波 (Extended Kalman Filter, EKF) 算法对参数进行估计,待估参数包括接收机坐标增量、接收机钟差、天顶对流层湿延迟和

载波相位模糊度。分析验后残差进行质量控制。具体的数据处理策略如表 1 所示。

表 1 误差模型及处理策略

Tab. 1 Precise point positioning error model and processing strategy

误差类型	测量误差	处理策略
与卫星有关的误差	卫星钟差	精密钟差产品改正
	卫星轨道误差	精密轨道产品改正
	卫星天线相位中心偏差/变化	PCO、PCV 模型改正
	相对论效应	模型改正
	相位缠绕	模型改正
与接收机和测站相关误差	接收机钟差	参数估计
	接收机天线相位中心偏差	PCO 模型改正
	地球自转	模型改正
	地球固体潮	模型改正
	海洋负荷潮汐	模型改正
与信号传播路径相关误差	对流层延迟	干延迟 Saastamoinen 模型改正、湿延迟估计,GMF 映射函数
	电离层延迟	双频消电离层组合

2 低轨导航增强半实物仿真验证系统

观测值的数学仿真是在测站及卫星的几何距离上加入各模型误差项以及噪声,以模拟观测数据。低轨卫星轨道低,所受到的大气阻力、地球非球形引力和广义相对论作用均明显高于中高轨。此外,卫星轨道低导致卫星运动速度快,轨道周期短,决定了在进行星座仿真时,为保证仿真数据精度,星历拟合周期、数据插值间隔等方面的要求高于中高轨卫星系统。本文选用更精细的力模型参数和处理策略,将低轨卫星星历参数增加至 20 个,

广播星历预报 15min 星历参数截断误差损失在 mm 量级。通过数学仿真给出的观测数据精确地生成射频信号,以模拟真实卫星信号,从而进行全链路物理信号验证。

如图 2 所示,低轨导航增强仿真验证系统由低轨导航增强模拟器和低轨导航增强终端组成,可实现 BDS 与大规模低轨导航卫星群的实时精密信号模拟仿真,以及时空基准统一的轨道、钟差、空间环境传输及误差仿真模拟,提供全星座信号信息及误差,模拟与仿真接收测量环境,支持组合精密定位算法和关键技术的试验仿真以及技术指标的测试验证。

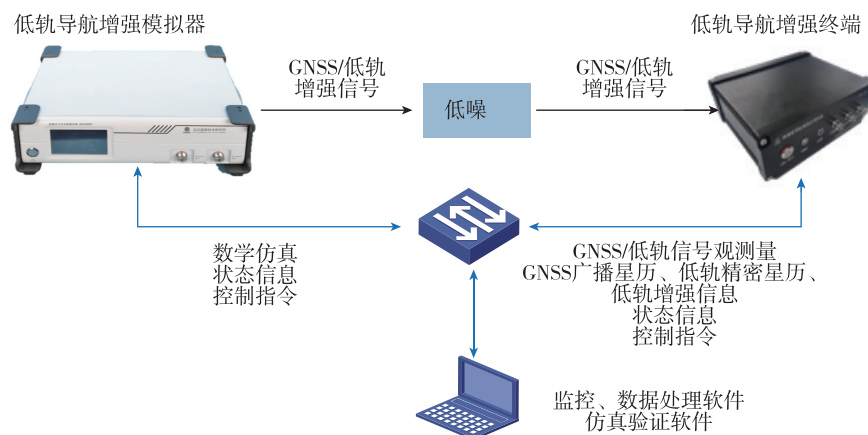


图 2 低轨导航增强仿真验证系统

Fig. 2 LEO navigation augmentation simulation evaluation system

2.1 低轨导航增强模拟器

低轨导航增强模拟器进行的组合仿真分为 BDS 星座仿真模块和低轨导航增强星座仿真模块。BDS 星座仿真模块仿真 BDS 全星座 (3GEO+3IGSO+24MEO)。低轨导航增强星座仿真模块的低轨星座采用 120 颗倾斜轨道星座+30 颗极轨星座结合的混合星座。倾斜轨道星座构型为 Walker 120/12/0, 轨道高度 975km, 轨道倾角 55° ^[19]; 极轨星座进动速度与 Walker 星座进动速度一致, 可实现全球任何地点任何时刻最低 10° 仰角的至少二重以上覆盖。

输入星历初始文件、载体轨迹、仿真时刻、闰秒等信息后, 数学仿真模块根据得到的初始轨道及仿真工程的具体设置和轨道积分, 生成整个工程所需要时间段的卫星轨道, 产生星历、历书等导航参数; 根据载体接收机和卫星位置生成卫星到接收机的几何距离, 考虑地球自转、对流层延迟、电离层延迟、相对论效应等各项误差改正, 生成卫星到接收机的伪距、伪距速度、伪距加速度、伪距加加速度供模拟信号源使用。模拟信号源使用数学仿真给出的观测数据精确生成射频信号。

除了实现低轨卫星轨道仿真、星历和历书信息仿真以及低轨卫星误差和观测值计算外, 低轨导航增强仿真模块还进行了增强信息仿真, 生成卫星轨道改正数、卫星钟差改正数、格网电离层改正数等信息, 时间基准统一到北斗时。半实物仿真系统的仿真误差配置如表 2 所示, 测试场景如图 3 所示。

表 2 半实物仿真误差配置

Tab. 2 Hardware-in-the-loop simulation error configtion

误差类型	仿真配置
BDS 轨道钟差	仿真轨道钟差+超快速预报轨道误差(5cm)+白噪声钟差误差(3cm)
低轨卫星轨道钟差	仿真轨道钟差+低轨定轨误差(5cm)+白噪声钟差误差(3cm)
电离层误差	GIM 内插, 高度角相关映射函数
对流层误差	Saastamoinen 模型, VMF1 映射函数
接收机钟差	随机量, 绝对量在 $1 \mu s$ 内
相对论效应	考虑, 理论公式计算
相位噪声	3mm
伪距噪声	1m

2.2 导航增强终端

导航终端一方面接收 BDS 及低轨星座的导航信号、广播星历, 另一方面接收低轨星座播发的

BDS 及低轨增强信息, 建立联合观测模型, 基于增强信息对观测值进行误差修正(精密轨道、钟差产品, 模型修正), 并利用低轨信号的快速变化特性, 实现载波相位快速收敛, 完成低轨增强的近实时 PPP 解算。

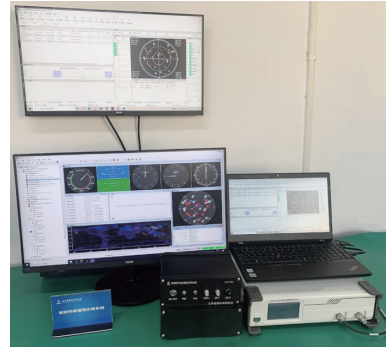


图 3 半实物仿真测试场景

Fig. 3 Hardware-in-the-loop simulation testing scenarios

3 低轨增强 BDS PPP 试验与结果分析

利用上述搭建的低轨导航增强验证平台进行了 BDS/LNS 联合定位观测仿真。选取 20 个 MGEX 测站仿真了 2021 年 6 月 3 日的 BDS 与低轨双系统伪距和载波相位观测数据, 将 snx 周解坐标设为测站真实坐标, 模拟的测站分布如图 4 所示。BDS 观测数据频点为 B1、B3, 采样率为 1s。利用 BDS 及低轨双星座观测数据分别进行单 BDS 和低轨增强 BDS 静态 PPP 试验。将 PPP 解算结果与测站真实坐标进行对比, 做差获得 E、N、U 这 3 个方向上的坐标偏差, 当 3 个方向上的定位偏差均小于 10cm 时, 认定为定位收敛。

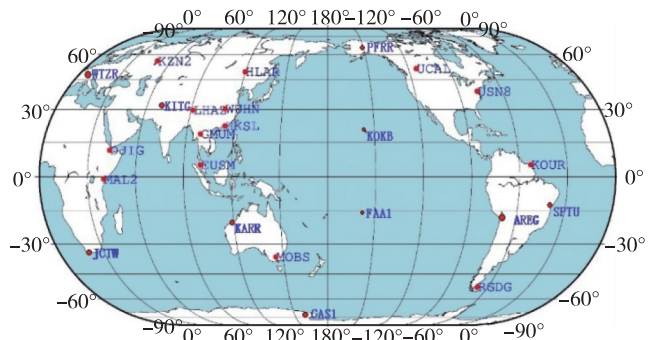


图 4 全球测试站分布

Fig. 4 Global monitoring station layout

3.1 定位收敛时间

对 20 个测站的 BDS 单独 PPP 以及 BDS+LNS

组合 PPP 结果进行统计,图 5 所示为 AREG 站初始 1h 的定位结果偏差序列。从图 5(a)可以看出,单 BDS 星座 PPP 达到收敛需要 24min,而低轨增强 BDS PPP 达到收敛所需时间较短,只需要 75s。从图 5(b)可以看出,定位收敛过程中存在收敛跳变,此过程对应的可见星数如图 6 所示。此时新加入了 1 颗低轨卫星,说明新加入的低轨卫星观测值可有效加快定位收敛。

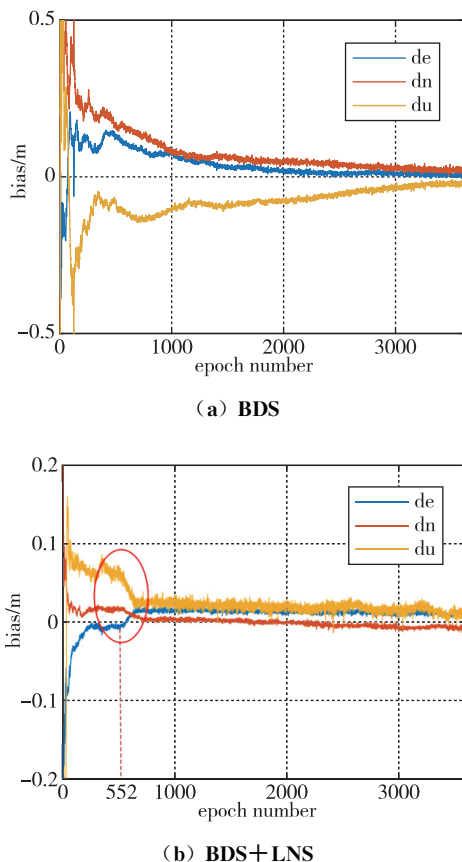


图 5 AREG 站 BDS、BDS+LNS PPP 定位偏差序列
Fig. 5 Position bias of BDS, BDS+LNS PPP at station AREG

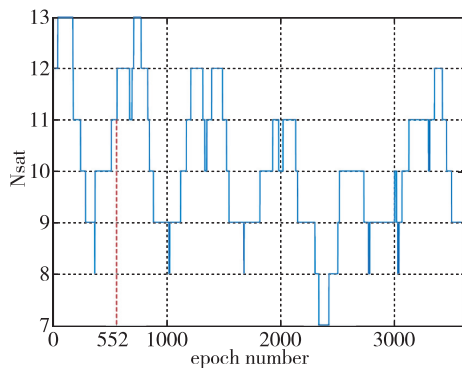


图 6 AREG 站 BDS、BDS+LNS PPP 可见卫星数
Fig. 6 Satellites number of BDS, BDS+LNS PPP at station AREG

20 个测站的 BDS PPP 以及 BDS+LNS PPP 收敛时间统计结果如图 7 所示。可以看出,单 BDS 星座进行 PPP 解算时,定位精度收敛到 10cm 以内大概需要十几分钟,这一点与实际情况相类似;而加入低轨导航卫星的观测值之后,定位精度收敛到 10cm 之内只需要 1min,模糊度的收敛速度加快。图 8 所示为该时段 BDS、BDS+LNS 的位置精度因子(Position Dilution of Precision, PDOP)值。可以看出,加入低轨卫星后,20 个测站的卫星几何分布均有提升。在采用 3GEO + 3IGSO + 24MEO 的 BDS 全星座构型下,20 个测站的 PDOP 值在 1.9 左右;加入低轨导航星座之后,20 个测站的 PDOP 值降为 1.5 左右。

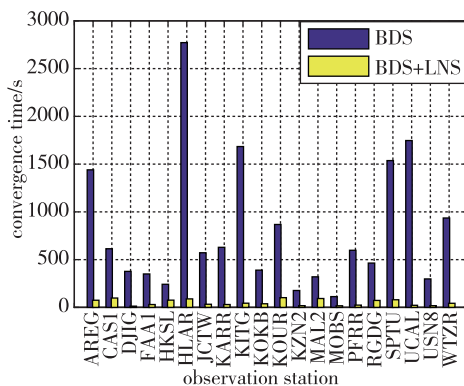


图 7 BDS、BDS+LNS 组合收敛时间(单位:秒)
Fig. 7 BDS, BDS+LNS convergence time(units: s)

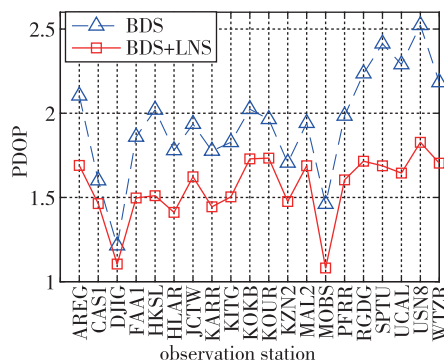
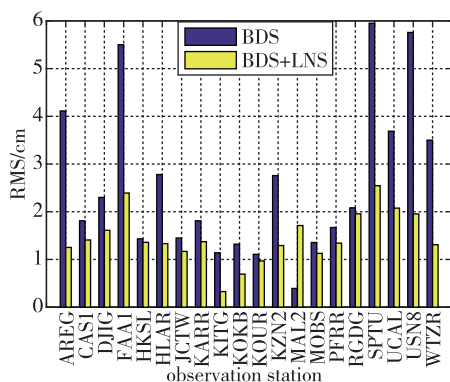


图 8 低轨星座加入后的 PDOP 改善情况
Fig. 8 BDS/BDS+LNS PDOP

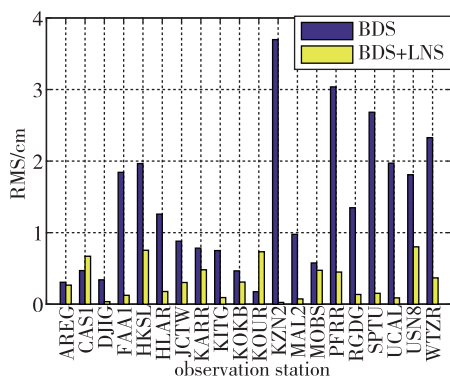
3.2 定位精度

在 PPP 解算模糊度收敛之后,截取 1h 的定位结果,计算 E、N、U 这 3 个方向上的坐标偏差 RMS,分析加入低轨导航星座之后对 PPP 精度的影响。3 个方向的定位精度如图 9 所示,20 个测站单

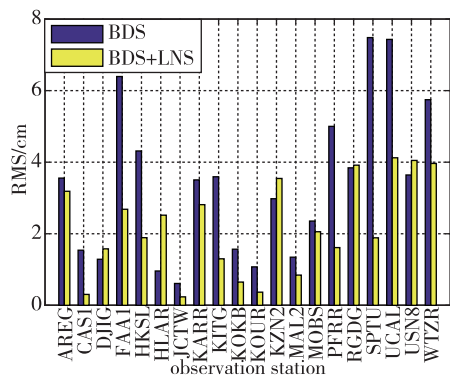
BDS 定位精度水平方向整体优于 5cm、高程方向整体优于 8cm。单 BDS PPP 东方向均值为 2.6cm,北方向均值为 1.4cm,高程方向均值为 3.4cm;加入低轨星座后,低轨增强 BDS PPP 东方向均值为 1.5cm,北方向均值为 0.3cm,高程方向均值为 2.2cm。20 个监测站收敛后组合定位较 BDS-3 单独精密定位,定位精度从 5cm 左右提升到 3cm 左右;各方向定位精度均有提高,东方向定位精度提升 42.3%,北方向定位精度提升 78.6%,高程方向定位精度提升 35.3%。



(a) 东方向定位精度



(b) 北方向定位精度



(c) 天方向定位精度

图 9 BDS+低轨星座组合精密定位精度改善情况
Fig. 9 BDS + LEO constellation precise position accuracy

4 结论

本文实现了低轨导航星座增强 BDS PPP 算法,并利用搭建的低轨导航增强半实物验证平台仿真双系统观测量,进行了单 BDS 及低轨增强 BDS PPP 试验,评估了低轨增强 BDS PPP 的定位性能。结果表明:1) 20 个测站 BDS 静态 PPP 收敛时间平均为 13min,加入低轨卫星观测值之后,PPP 精度收敛到 10cm 之内只需要 1min,说明新加入的低轨导航星座对 PPP 收敛速度有很大提升,给 PPP 技术的实时应用提供了可能;2) 截取收敛后 1h 的定位结果,收敛后的组合定位精度可提升至 3cm,各方向定位精度均有提高,低轨卫星观测值可提高 PPP 精度;3) 研制的低轨导航增强仿真验证系统可实现时空基准统一的 BDS 及低轨信号仿真,提供全星座信号信息及误差,模拟与仿真实接收测量环境,支持精密定位算法和关键技术的全链路闭环试验以及技术指标的测试验证。

参考文献

- [1] 杨元喜. 综合 PNT 体系及其关键技术[J]. 测绘学报, 2016,45(5): 505-510.
Yang Yuanxi. Concepts of comprehensive PNT and related key technologies[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(5): 505-510 (in Chinese).
- [2] 张小红, 马福建. 低轨导航增强 GNSS 发展综述[J]. 测绘学报, 2019, 48(9): 1073-1087.
Zhang Xiaohong, Ma Fujian. Review of the development of LEO navigation-augmented GNSS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(9): 1073-1087 (in Chinese).
- [3] 卢鋈, 张弓, 申建华, 等. 低轨增强星座对卫星导航系统能力提升分析[J]. 卫星应用, 2020(2): 49-54.
Lu Yun, Zhang Gong, Shen Jianhua, et al. Analysis of the ability improvement of satellite navigation system by LEO enhanced constellation [J]. Satellite Navigation, 2020(2): 49-54 (in Chinese).
- [4] 沈大海, 蒙艳松, 边朗, 等. 基于低轨通信星座的全球导航增强系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(2): 209-215.
Shen Dahai, Meng Yansong, Bian Lang, et al. A global navigation augmentation system based on LEO communication constellation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(2): 209-215 (in Chinese).
- [5] 梁涛涛, 张伟, 施伟璜, 等. 基于低轨卫星增强的非差高精度导航定位技术与在轨试验验证[J]. 上海航天,

- 2019,36(1):16-22.
- Liang Ertao, Zhang Wei, Shi Weihuang, et al. Non-difference high-precision navigation and positioning technology based on low earth orbit satellite augmentation and experimental verification on orbit [J]. Aerospace Shanghai, 2019,36(1):16-22(in Chinese).
- [6] Li X, Ge M, Dai X, et al. Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLO-NASS, BeiDou, and Galileo [J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(6): 607-635.
- [7] 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.
- Li Xingxing. Rapid ambiguity resolution in GNSS precise point positioning[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013 (in Chinese).
- [8] 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.
- Ma Fujian. Research on the key technologies for GNSS precise positioning augmented with LEO constellation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018(in Chinese).
- [9] 赵兴隆, 钟世明, 欧吉坤, 等. LEO 星座增强 GNSS 的精密单点定位初步分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(6): 624-628.
- Zhao Xinglong, Zhong Shiming, Ou Jikun, et al. Precise point positioning primary analysis of GNSS enhanced with LEO constellation [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(6): 624-628(in Chinese).
- [10] Reid T G, Neish A M, Walter T F, et al. Leveraging commercial broadband LEO constellations for navigating [C]// Proceedings of 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION BDS + 2016). Portland, Oregon: ION, 2016: 2300-2314.
- [11] Gebhardt C. Iridium boss reflects as final NEXT satellite constellation launches [EB/OL]. 2019-01-11.
- [12] Ke M, Lv J, Chang J, et al. Integrating GPS and LEO to accelerate convergence time of precise point positioning [C]// Proceedings of 7th International Conference on Wireless Communications and Signal. Nanjing, China: IEEE, 2015: 1-5.
- [13] Su M, Su X, Zhao Q, et al. BeiDou augmented navigation from low Earth orbit satellites [J]. Sensors, 2019, 19(1): 198.
- [14] Ge H, Li B, Ge M, et al. Initial assessment of precise point positioning with LEO enhanced global navigation satellite systems (LeGNSS) [J]. Remote Sensing, 2018, 10(7): 984.
- [15] Li X, Ma F, Li X, et al. LEO constellation augmented multi-GNSS for rapid PPP convergence [J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(5): 749-764.
- [16] Li X, Li X, Ma F, et al. Improved PPP ambiguity resolution with the assistance of multiple LEO constellations and signals [J]. Remote Sensing, 2019, 11(4): 408.
- [17] 张小红, 李星星, 李盼. GNSS 精密单点定位技术及应用进展 [J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1399-1407.
- Zhang Xiaohong, Li Xingxing, Li Pan. Review of GNSS PPP and its application [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1399-1407 (in Chinese).
- [18] 张小红, 左翔, 李盼, 等. BDS/GPS 精密单点定位收敛时间与定位精度的比较 [J]. 测绘学报, 2015, 44(3): 250-256.
- Zhang Xiaohong, Zuo Xiang, Li Pan, et al. Convergence time and positioning accuracy comparison between BDS and GPS precise point positioning [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(3): 250-256 (in Chinese).
- [19] 苏醒. 基于高中低轨卫星的全球实时 cm 级导航系统理论与方法研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- Su Xing. Theory and method research for global real-time centi-meter level navigation system based on high, medium and low orbit satellites [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017 (in Chinese).

(编辑: 李瑾)