



引文格式:张勤,王乐,赖文,等.低轨增强北斗的星地一体化系统仿真及综合性能评估研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(11):1863-1875.DOI:10.13203/j.whugis20230342

Citation: ZHANG Qin, WANG Le, LAI Wen, et al. Simulation and Comprehensive Performance Evaluation of the Integrated Space-Ground System for Low Earth Orbit-Enhanced BeiDou Navigation Satellite System[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(11):1863-1875.DOI:10.13203/j.whugis20230342

低轨增强北斗的星地一体化系统仿真及综合性能评估研究

张勤¹ 王乐¹ 赖文¹ 王麒宁¹ 龙正鑫¹

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

摘要:北斗卫星导航系统将考虑纳入低轨星座,通过高中低轨星座融合,构建全球覆盖时空网络。然而,低轨星座正处于建设阶段,对低轨增强北斗系统的研究尚缺少仿真和多方位的性能评估。围绕低轨增强北斗系统高逼真仿真和增强性能多方位评估开展研究,构建了融合实际测量数据和空间物理理论模型的高逼真低轨星座仿真模型,提出了低轨增强系统综合性能评估方法,设计建立了低轨增强北斗的星地一体化系统仿真及综合性能评估平台,揭示了低轨星座对已有导航系统性能增强效果。结果显示,在系统侧方面,低轨增强在提升北斗精密产品精度的同时可减少地面测站数量及分布限制;在用户侧方面,低轨卫星的加入有望使北斗精密单点定位收敛时间缩短至10 min以内。研究成果可为低轨增强导航系统建设提供理论和应用支撑。

关键词:低轨星座;低轨增强北斗系统;高逼真仿真;综合性能评估

中图分类号:P228.4

文献标识码:A

收稿日期:2023-09-18

DOI:10.13203/j.whugis20230342

文章编号:1671-8860(2023)11-1863-13

Simulation and Comprehensive Performance Evaluation of the Integrated Space-Ground System for Low Earth Orbit-Enhanced BeiDou Navigation Satellite System

ZHANG Qin¹ WANG Le¹ LAI Wen¹ WANG Qining¹ LONG Zhengxin¹

1 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: Objectives: The integration of low earth orbit (LEO) constellations into the BeiDou satellite navigation system has been under consideration, aiming to establish a global coverage space-time network through the fusion of high, medium, and low earth orbit constellations. However, it should be noted that the LEO constellation is currently in the construction phase, and there is a lack of comprehensive simulation and performance evaluation for the LEO-enhanced BeiDou system. Methods: Therefore, In this contribution, research is conducted centered around the highly realistic simulation and comprehensive performance evaluation of the LEO-enhanced BeiDou system, a sophisticated simulation model of the LEO constellation was developed by integrating actual measurement data and space physics theoretical models, and then a comprehensive performance evaluation method for the LEO-enhanced system was proposed, and an integrated space-ground platform for simulation and comprehensive performance evaluation of the LEO-enhanced BeiDou system was designed and established, the research findings revealed the performance enhancement effects of the LEO constellation on the existing navigation system. Results: The results indicate that, on the system-terminal, the LEO augmentation improves the precision of BeiDou's high-precision

基金项目:国家重大科研仪器研制项目(42127802)。

第一作者:张勤,博士,教授,研究方向为空间定位技术理论与方法及地质灾害监测预警。zhangqinle@263.net.cn

通讯作者:王乐,博士,高级工程师。rexlele@163.com

products while simultaneously reducing the limit on the number and distribution of ground stations. On the user-terminal, the inclusion of LEO satellites holds the potential to reduce the convergence time of BeiDou precise point positioning to less than 10 minutes. **Conclusions:** The research results provide theoretical and practical support for the development of the LEO-enhanced navigation system.

Key words: LEO constellations; LEO-enhanced BeiDou system; highly realistic simulation; comprehensive performance evaluation

目前,利用低轨(low earth orbit, LEO)星座实现全球互联网通信、导航等的构想受到越来越多的关注^[1], Iridium^[2]、SpaceX^[3]、Centi-Space^[4]、GW^[5]等大型LEO星座项目相继被提出。中国卫星导航系统管理办公室也在《新时代的中国北斗》白皮书发布会^[6]上提出,在2035年前,中国将研究并建造新一代北斗系统,考虑纳入低轨卫星,提供覆盖全球的高精度PNT(positioning, navigation and timing)服务。LEO星座有望提高全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)的整体服务性能,尤其是对北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS),同时可削弱GNSS精密产品对地面站的依赖性^[7],减少精密单点定位(precise point positioning, PPP)的收敛时间^[8-10]及克服城市复杂环境中GNSS信号弱甚至信号缺失的问题^[11-12]。此外,LEO还可实现大气空间环境的快速建模^[13]等增强应用。然而,中国LEO卫星星座建设工作刚刚起步,LEO星座对于GNSS系统多方位的性能评估尚不完善。

对于LEO星座设计,Zhang等^[14]设计的面向中国区域的Walker星座构型,通过差分进化算法得出的最佳倾角为131.9°或者48.1°。田野等^[15]调研得出1 000 km以下飞行器的数目将呈爆发式增长,为了远离电离层,建议低轨卫星轨道高度高于1 000 km。此外,聂欣等^[16]提到低轨卫星完成独立定位,需要至少400颗卫星才能达到这一标准。若只是满足增强系统的需求,低轨卫星需要满足对地面的单、双层覆盖,需要的卫星数量只在60~150颗。利用LEO可以充当天基监测站,实现对GNSS系统侧性能增强。Huang等^[17]及Li等^[18]利用已存在的LEO卫星进行了LEO增强GNSS(LEO-enhanced GNSS, LeGNSS)精密定轨(precise orbit determination, POD)实验,结果显示,当地面跟踪站数量或者分布受限制时,加入LEO后可以极大地提高GNSS轨道解算精度。Li等^[19]基于模拟GNSS观测数据,揭示了LEO星座对于GNSS POD性能提升,所有GNSS卫星的

POD精度均可显著提高70%以上。Li等^[20]模拟了66颗铱星星座卫星探究LEO星座对于GNSS空间信号距离误差(signal-in-space ranging errors, SISRE)的增强效果,结果显示BDS和GPS的SISRE得到明显减少。曾添等^[21]针对北斗三号卫星设计了小型化LEO增强星座,结果显示小型化LEO星座足够增强北斗三号卫星,且更具可行性。

LEO也可以播发下行数据增强GNSS用户侧性能,王磊等^[22]及Wu等^[23]对已有低轨增强卫星数据质量进行了分析,结果显示低轨卫星增强信号测量精度与GNSS信号处于同一水平,最大载噪比则高于GNSS信号,可达60 dB Hz。贺延伟^[24]通过使用不同种类的LEO卫星星座对BDS进行仿真研究,结果显示LEO可以极大降低BDS系统定位精度因子(position dilution of precision, PDOP),提高定位几何强度。Ge等^[25]、Su等^[26]及Ma等^[27]则对LeGNSS PPP进行了实验,结果显示LEO可以大幅度减少PPP收敛时间,以“微厘空间”星座情况为例^[26],加入LEO后,BDS PPP收敛时间可由30 min缩短至1 min。

综上,已有的研究中关注的低轨增强性能较为单一,尚未结合系统侧和用户侧对低轨增强系统进行综合评价,更无法一体化实现对低轨增强系统设计及其性能全面评估。因此本文主要针对低轨增强北斗系统,研究增强数据高逼真仿真和增强性能多方位评估,提出低轨增强北斗的星地一体化系统仿真及综合性能评估方法。本文研究成果可为中国刚刚起步的低轨增强导航系统建设提供技术支撑。

1 LEO星座和数据仿真算法

LEO星座及多种导航增强观测数据的高逼真仿真是全面综合评估LEO增强系统性能方法的前提条件。本文建立了融合实际测量数据和空间物理理论模型的高逼真低轨星座仿真模型,并提出了一套全面考虑多种观测数据误差的高逼真观测数据仿真算法。

1.1 LEO 增强星座轨钟仿真算法

1.1.1 LEO 增强星座卫星轨道仿真算法

1)根据 Walker 星座的开普勒 6 参数计算卫星初始轨道。LEO 导航增强卫星轨道仿真首先需要根据开普勒 6 参数确定不含动力学信息的 LEO 初始轨道。为免赘述,算法可参照相关研究。

2)在已知卫星某一时刻的位置、速度、光压及大气阻力参数情况下,进行数值积分,得到任意时刻卫星的位置和速度。轨道积分采用的 LEO 卫星的复杂动力学模型如表 1 所示。初始轨道第一次轨道积分时,光压及大气阻力等动力学参数设置为 0,其后通过轨道拟合获取其精密参数。

表 1 仿真 LEO 轨道的动力学模型信息

Tab. 1 Dynamical Model for Simulating LEO Orbit

动力学模型	模型信息
地球重力	EGM(120×120)
N 体引力	JPL DE405
固体潮和极潮	IERS 2010
海洋潮汐	FES 2004
相对论	IERS 2010
太阳光压	Box-Wing 模型
大气阻力	DTM94
经验力参数	在轨道切向(A)、法向(C)及径向(R),每转一圈添加一个常数周期性加速度参数(sin 和 cos)

3)将积分得到的轨道和基准轨道(轨道仿真时,其为初始轨道)进行对比,形成观测方程,解算得到轨道积分起始历元各卫星的位置、速度和光压参数的改正值。最后轨道积分一次,得到的 LEO 轨道即可当作真实无误差的 LEO 卫星轨道,内含了各种动力学模型信息。

1.1.2 LEO 增强星座卫星钟差仿真算法

LEO 卫星仿真钟差由确定项部分及噪声项部分组成,其中确定项部分分为卫星钟偏差 a_0 、卫星钟漂移 a_1 及卫星钟漂移速度 a_2 ,噪声项部分为随机白噪声 ϵ_{clk} 。其公式如下:

$$CLK_i = a_0 + a_1(t_i - t_0) + a_2(t_i - t_0)^2 + \epsilon_{clk} \quad (1)$$

式中, CLK_i 为 LEO 卫星第 i 个历元的卫星钟差; t_i 为当前历元时刻; t_0 为初始历元时刻。由于低轨导航卫星原子钟性能暂时未知,本文低轨卫星钟差仿真的确定项及随机噪声项量级参考 Rb 钟获得。

1.2 多种导航增强观测数据仿真算法

1.2.1 星地/星载 GNSS 观测数据仿真

星地/星载 GNSS 观测数据仿真数据模型如下:

$$\begin{cases} P_{G,j}^s = \rho_G^s + c(\Delta t_G - \Delta t^s) + T_G^s + I_{G,j}^s + \epsilon_{P_{G,j}} \\ P_{L,j}^s = \rho_L^s + c(\Delta t_L - \Delta t^s) + I_{L,j}^s + \epsilon_{P_{L,j}} \\ L_{G,j}^s = \rho_G^s + c(\Delta t_G - \Delta t^s) + T_G^s - \\ \quad I_{G,j}^s + \lambda_j b_{G,j}^s + \epsilon_{L_{G,j}} \\ L_{L,j}^s = \rho_L^s + c(\Delta t_L - \Delta t^s) - I_{L,j}^s + \lambda_j b_{L,j}^s + \epsilon_{L_{L,j}} \end{cases} \quad (2)$$

式中,上标 s 和下标 L, G 和 j 分别表示 GNSS 卫星、LEO 卫星、地面测站和信号频率; P 和 L 分别表示伪距和载波相位观测值; ρ 为 GNSS 卫星和接收机之间的天线相位中心距离。因此,需要使用 GNSS 卫星和地面接收机的相位中心偏差(phase center offset, PCO)和相位中心变化(phase center variation, PCV)对 GNSS 卫星和测站坐标进行校正。GNSS 卫星 PCO 和 PCV 校正使用 igs14.atx 的值, LEO 卫星及仿真的地面测站 PCO 和 PCV 设为 0。 c 为在真空中的光速; Δt_G 和 Δt_L 是地面测站和星载接收机的钟差; Δt^s 表示卫星钟差,对于 GNSS 卫星钟差,使用武汉大学 IGS 分析中心最终钟差产品, LEO 卫星及仿真的地面测站模拟为白噪声; T_G^s 是卫星到地面站视线方向上的对流层延迟,它包含干延迟和湿延迟,干延迟可以通过 Saastamoinen 模型和全球映射函数得到,而湿延迟暂未考虑。LEO 卫星在对流层之上,所以星载 GNSS 观测不受对流层的影响。 $I_{G,j}^s, I_{L,j}^s$ 分别是地面测站和 LEO 卫星的 j 频率在传播路径上的电离层延迟,其作用在伪距和载波上,数值相同,符号相反。利用国际 GNSS 服务组织(international GNSS service, IGS)发布的电离层格网文件,通过时间和空间插值的方法可以计算出电离层一阶延迟。在考虑低轨卫星星载观测值的电离层延迟时,认为电离层的带电粒子在不同高度处均匀分布,通过传播高度占电离层总高度进行缩小。 $b_{G,j}^s, b_{L,j}^s$ 是波长 λ_j 的载波相位整周模糊度; $\epsilon_{P_{G,j}}$ 和 $\epsilon_{P_{L,j}}$ 是频率 j 的地面和星载 GNSS 数据伪距测量噪声; $\epsilon_{L_{G,j}}, \epsilon_{L_{L,j}}$ 是频率 j 的地面测站接收机和星载接收机的载波测量噪声,测量噪声可由仿真时通过配置参数设置,本文星地 GNSS 伪距和载波相位观测的标准差(standard deviation, STD)分别为 1.5 m 和 4 mm, 星载 GNSS 的 STD 分别为 2 m 和 8 mm。同时,在模

拟中考虑了相对论修正、相位缠绕和潮汐偏移,多路径由于需要根据实际GNSS数据进行提取,因此本文暂未做其他考虑。

1.2.2 星地 LEO 观测数据仿真

星地 LEO 观测数据详细的模拟公式如下:

$$\begin{cases} P_{G,j}^L = \rho_G^L + c(\Delta t_G - \Delta t^L) + T_G^L + I_{G,j}^L + \epsilon_{P_{G,j}}^L \\ L_{G,j}^L = \rho_G^L + c(\Delta t_G - \Delta t^L) + T_G^L - I_{G,j}^L + \lambda_j b_{G,j}^L + \epsilon_{L_{G,j}}^L \end{cases} \quad (3)$$

式中,上标 L 和下标 G,j 分别表示低轨卫星、地面测站和信号频率; P 和 L 分别表示伪距和载波相位观测值; 其余参数含义与§1.2.1 相同。值得注意的是, LEO 仿真钟差在此处充当卫星钟差。此外, 在考虑 LEO 星地观测值的电离层延迟时, 同样认为电离层的带电粒子在不同高度处均匀分布。本文将测量噪声伪距和载波相位观测分别设置为 2 m 和 8 mm, 多路径暂未做其他考虑。

2 多方位 LEO 导航增强 BDS 性能评估算法

为全面评估 LEO 增强系统的增强性能, 本文提出一套多方位的低轨增强系统综合性能评估方法, 从系统侧和用户侧出发, 实现对低轨增强系统增强性能的全面评估。

2.1 系统侧性能评估算法

2.1.1 GNSS 跟踪弧段完整性性能评估算法

GNSS 跟踪弧段完整性评估是指计算 GNSS 卫星的可被跟踪观测弧段占总观测弧段的百分比, 定义卫星能被一个测站跟踪监测到时即可被标记为可观测历元。可观测弧段的百分比越高, 说明地基或者天基测站网的几何构型越好, 对卫星跟踪监测性能越好。百分比计算公式如下:

$$R = \frac{\sum S_i}{S_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中, R 为可观测弧段占比; 卫星的被观测历元可记为 S_i ; 卫星的总历元数为 S_0 。

2.1.2 GNSS 精密定轨/钟差估计性能评估算法

GNSS 精密轨道钟差解算方法过于复杂, 前人已有研究, 这里仅介绍精度评定方法, 轨道质量可通过与参考轨道对比两个轨道之间的轨道 A 、 C 、 R 和 3D 方向均方根 (root mean square, RMS) 值来评定^[28], 钟差精度可通过与参考钟差进行二次差求得钟差 STD 值来评定^[29]。

此外, 由于对区域测站而言, 对于 GNSS 卫星全弧段跟踪时, 存在较多不能跟踪弧段及跟踪不足弧段, 将导致钟差无法解算或者解算严重错误的情况, 因此引入钟差有效率 (effective rate, ER) 评估指标。ER 被定义为该卫星有效历元数与待评估总历元数的比值, 该卫星有效历元定义为该历元求得的二次差 STD 值不等于 0 且绝对值小于 50 ns。计算公式如下:

$$ER^j = \frac{n_{er}^j}{n_{total}^j}, n_{er}^j = \sum_i^{n_{total}^j} \rho_i^j \quad (5)$$

式中, ER^j 为第 j 颗卫星钟差有效率; n_{er}^j 为第 j 颗卫星钟差有效历元数; n_{total}^j 为第 j 颗待评估弧段总历元; ρ_i^j 为第 j 颗卫星第 i 个历元钟差有效性决策因子, 定义如下:

$$\rho_i^j = \begin{cases} 1, \text{std}_i^j \neq 0 \text{ 且 } |\text{std}_i^j| < 50 \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中, std_i^j 为第 j 颗卫星第 i 个历元求得的二次差 STD 值。

2.1.3 空间信号测距精度性能评估算法

空间信号测距精度是卫星轨道和钟差的实际值与解算的卫星轨道和钟差之差投影到卫星——用户视线上的等效距离误差, 这项数据反映的是解算的轨道及钟差的精度, 并最终影响导航用户的定位精度, 是评估导航系统空间信号和其服务性能的主要参数。受轨道和钟差误差影响的全球平均 SISRE 的具体计算式为:

$$E_{SISRE} = \sqrt{(w_R \cdot \Delta r_R - c \cdot \Delta T)^2 + w_{A,C}^2 \cdot (\Delta r_A^2 + \Delta r_C^2)} \quad (7)$$

式中, c 是光速; w_R 和 $w_{A,C}$ 分别为轨道 R 、 A 和 C 方向误差对 SISRE 的贡献因子, 与卫星的轨道高度有关^[30-31]; Δr_A 、 Δr_C 和 Δr_R 分别是真实的卫星位置与解算得到的卫星位置的差值在轨道 A 、 C 、 R 方向上的数值; ΔT 是真实的卫星钟差与解算得到的卫星钟差的差值。

2.2 用户侧性能评估算法

1) 监测站覆盖性评估算法

监测站覆盖性是指地面的监测站对所设计的低轨星座以及 GNSS 星座的跟踪情况, 依据设定的高度角, 统计特定时刻或者某一时间段内每个测站可以跟踪到的低轨卫星数目和 GNSS 卫星数目。

2) 空间几何强度因子评估算法

PDOP 是表征卫星与接收机相对位置几何强度的参数, 用户的定位精度可以简单表示为

空间几何强度因子和用户测距误差的乘积,在用户测距误差一定的情况下,PDOP 越大,定位精度越差;PDOP 越小,定位精度越高。前人已经对 PDOP 定义进行详细描述^[32],此处不再赘述。

3) 地面精密定位精度评估

地面测站精密定位的位置解算方法过于复杂,前人已有研究,此处仅介绍精密定位的精度评定方法,通过精密定位解算出的测站位置与测站参考坐标作差,得到二者在东方向(E)、北方向(N)、天顶方向(U)和 3D RMS 值来评定精密定位的定位精度。

3 系统仿真及综合性能评估

3.1 系统架构

低轨增强北斗的星地一体化系统仿真及综合性能评估系统软件基于脚本及可执行程序进行开发实现,包含了低轨星座及数据仿真与增强性能评估两部分,见图 1。首先通过高逼真低轨星座轨道及钟差仿真算法确定时空基准,然后基于数据仿真算法生成北斗/低轨及地面测站间的复杂测量链路数据,最后基于生成的复杂测量链路数据,全面评估设计的低轨增强星座增强性能。

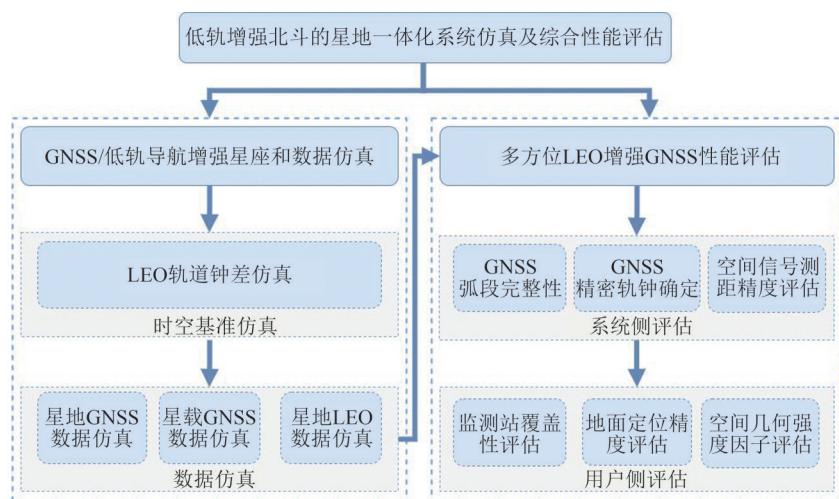


图 1 低轨增强北斗的星地一体化系统仿真及综合性能评估系统架构

Fig. 1 Framework of Simulation and Comprehensive Performance Evaluation of the Integrated Space-Ground System for LEO-Enhanced BDS

3.2 系统仿真

为了展示低轨增强北斗的星地一体化系统仿真及综合性能评估效果,本文设置的仿真 GNSS 星座轨道及钟差由武汉大学 IGS 分析中心最终轨道钟差产品获得,仿真卫星包含了 GPS、

GLONASS、Galileo、BDS2 及 BDS3 卫星,BDS3 地球静止轨道卫星(geosynchronous earth orbit, GEO)和准天顶卫星系统未被仿真。LEO 星座为 Walker108/12/1 星座,其轨道高度为 1 175 km,轨道倾角为 48°,其三维及二维视图如图 2 所示。

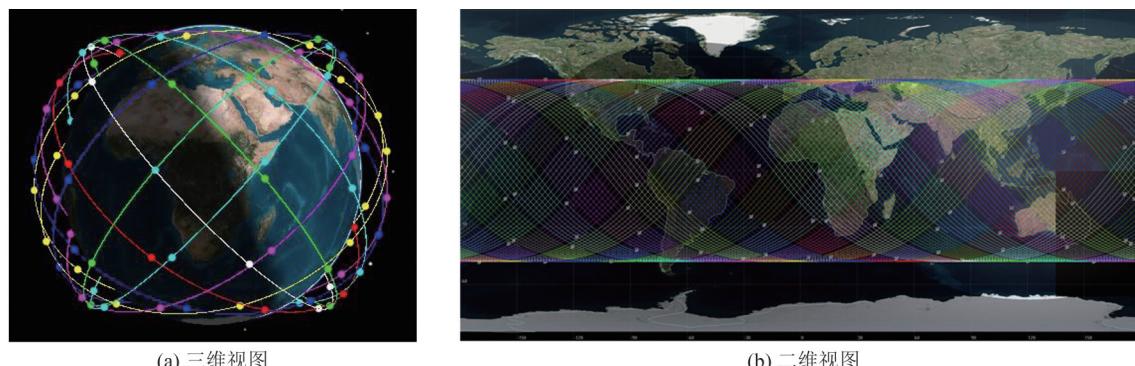


图 2 Walker108/12/1 星座三维视图及二维视图

Fig. 2 Walker108/12/1 Constellation Three-Dimensional and Two-Dimensional Views

关于地面站部分,在中国区域均匀选择24个测站,如图3所示。仿真了2022年年积日001天的观测数据,以进行综合性能评估,对于星地LEO数据频点,将其设置为与BDS3系统一致,数据仿真策略如表2所示。

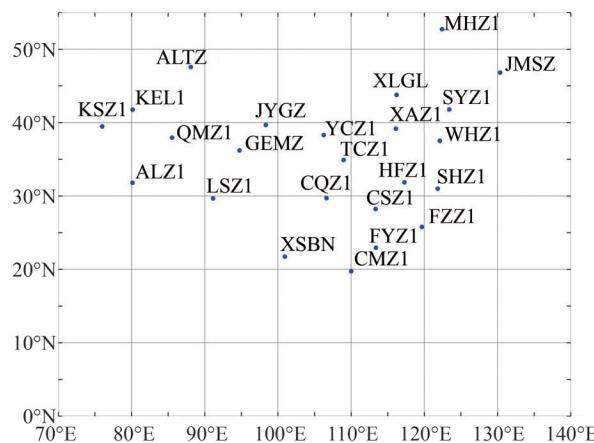


图3 地面测站分布图

Fig. 3 Distribution of Ground Stations

表2 数据仿真策略

Tab. 2 Simulation Strategy of Observation

类型	仿真模型描述
观测数据	伪距和载波观测值:GPS:L1,L2;BDS2及BDS3:B1I,B3I;GLONASS:G1,G2;Galileo:E1,E5a
数据采样率/s	30 随机生成整数0~100;星地GNSS数据:24 h弧段单频模糊度总数设置为10个,两个频点周跳历元位置随机产生;
模糊度参数	星载GNSS及星地LEO数据:24 h弧段单频模糊度总数设置为50个,两个频点周跳历元位置随机产生
PCO/PCV	GNSS卫星采用igs14.atx,地面站和低轨卫星不考虑
对流层延迟	星地GNSS/LEO干延迟采用SAAF+GMF计算,不考虑湿延迟;星载GNSS不考虑两者星地GNSS:IGS电离层格网文件插值获得;星载GNSS及星地LEO:认为电离层的带电粒子在不同高度处均匀分布,基于IGS电离层格网文件插值获得覆盖整个电离层的投影路径电离层延迟,然后基于传播高度占总电离层高度比例获得最终电离层延迟
电离层延迟	模型计算
相位缠绕	模型计算
固体潮	IERS Conventions 2003
相对论效应	模型计算
测量噪声	星地GNSS:伪距为1.5 m,载波为4 mm;星载GNSS/星地LEO:伪距为2 m,载波为8 mm

3.3 性能评估

3.3.1 系统侧性能评估

本节分析低轨卫星对GNSS卫星系统侧性

能的增强效果。首先分析仅地面测站和加入LEO后跟踪GNSS弧段完整性;其次基于区域监测网和LEO天基监测网实现GNSS精密产品确定,评估在区域监测网情况下加入LEO卫星对GNSS精密产品的性能提升,并以SISRE结果展示对定位用户的性能提升。值得注意的是,由于区域监测网单天内对GNSS观测弧段不足,导致无法获得正确的轨道精度,因此区域监测网精密产品解算采用年积日001~003这3天观测弧段实现,加入LEO天基监测网后仅基于年积日001天观测弧段实现。详细解算策略见表3。

表3 数据处理策略和相关模型描述

Tab. 3 Description of Data Processing Strategies and Related Models

类型	数据处理和模型描述
观测弧段长度	区域监测网:72 h;区域监测网+LEO:24 h 无电离层组合观测值:GPS:L1/L2;BDS2及BDS3:B1I/B3I;GLONASS:G1/G2;Galileo:E1/E5a
观测数据	GPS/GLONASS/BDS2/BDS3 IGSO:5参数ECOM1模型;BDS3 MEO:添加先验加速度的ECOM1模型 ^[33] ;Galileo:添加先验加速度的ECOM1模型 ^[34] ;LEO:Box-Wing模型
太阳光压模型	GNSS:无;LEO:DTM 94模型,每360 min添加一个常量尺度参数
大气阻力	GNSS:无;LEO:DTM 94模型,每360 min添加一个常量尺度参数
经验力模型	GNSS:无;LEO:每一个轨道周期在切向、法向及径向估计一组周期性常数经验力(sin和cos项) ^[35]
重力场模型	GNSS:EGM 12×12;LEO:EGM 150×150 高度角(E)定权, $E > 30^\circ$,权为1,否则为 $2\sin E$;截止高度角7°
观测值权	300 常数估计
数据采样率/s	星地GNSS数据双差模糊度约束法方程,星载GNSS浮点解模式
系统间偏差	GNSS卫星采用igs14.atx,地面站和低轨卫星不考虑
模糊度参数	地面站干延迟采用SAAF+GMF计算,不考虑天顶湿延迟,而LEO卫星不考虑两者
卫星PCO/PCV	JPL DE405
对流层延迟	IERS Conventions 2003
N体引力	IERS Conventions 2003
固体潮	IERS Conventions 2003
相对论效应	IERS Conventions 2003

由图4可见,BDS卫星的跟踪率优于其他3个系统,其中对于BDS GEO和倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit, IGSO)可以达到100%,这是由于所选测站均位于中国区域。由表4可知, GPS、Galileo、GLONASS 及 BDS 中

地球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星跟踪率分别为 80%、78%、79% 及 83%, 这将导致 GNSS 轨道确定精度较低及钟差有效率不足。加入

LEO 卫星充当天基监测站后, GNSS 弧段完整率均实现了 100% 的跟踪率, 可以对 MEO 卫星进行全弧段跟踪。

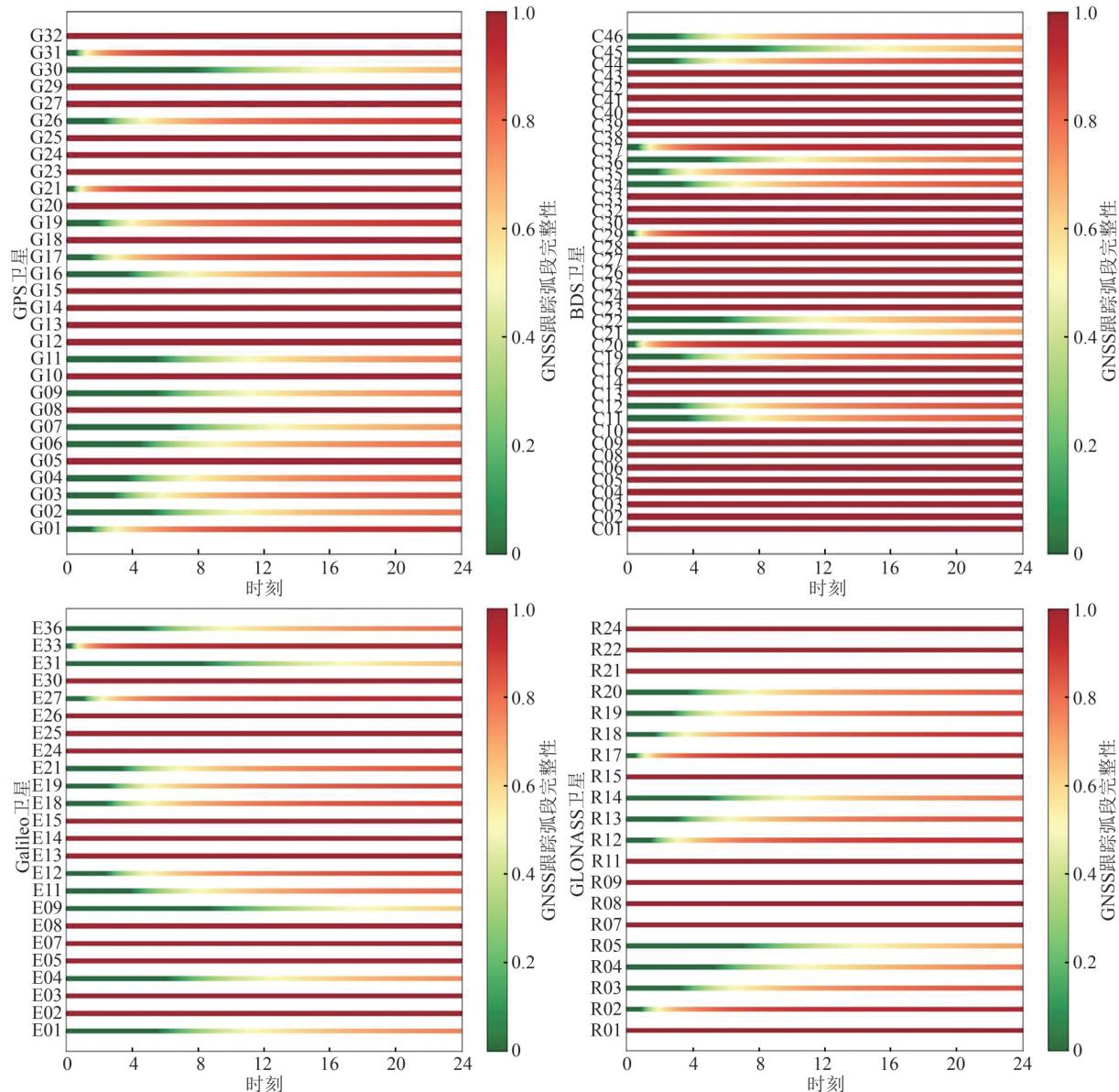


图 4 仅地面测站跟踪 GNSS 弧段完整性结果

Fig. 4 GNSS Arc Integrity Results Tracked only by Ground Stations

表 4 跟踪 GNSS 弧段完整性/%

Tab. 4 GNSS Arc Integrity Tracking/%

卫星系统	Station-only	Station+LEO
GPS	80	100
GLONASS	78	100
Galileo	79	100
BDS_GEO	100	100
BDS_IGSO	100	100
BDS_MEO	83	100

GNSS 弧段跟踪完整性提升将有利于精密产品服务性能, 图 5 及表 5 展现了在仅区域地面站

情况下与加入 LEO 卫星充当天基监测站情况下 GNSS 卫星轨道精度。为显示 LEO 对 GNSS POD 性能的提升, 图 5 中折线呈现了不同卫星系统、不同卫星种类的提升率。可见在仅地面站的情况下, MEO 和 IGSO 卫星均能获得优于 20 cm 的轨道精度。对于 GEO 卫星, 其轨道精度达到米级, 这是由于 GEO 卫星静地特性导致的。在加入 LEO 卫星之后, MEO 和 IGSO 卫星均能获得优于 5 cm 的轨道精度, 提升率为 60%~80%; BDS GEO 卫星轨道精度可由米级提升至 20 cm 左右, 提升率为 96%。

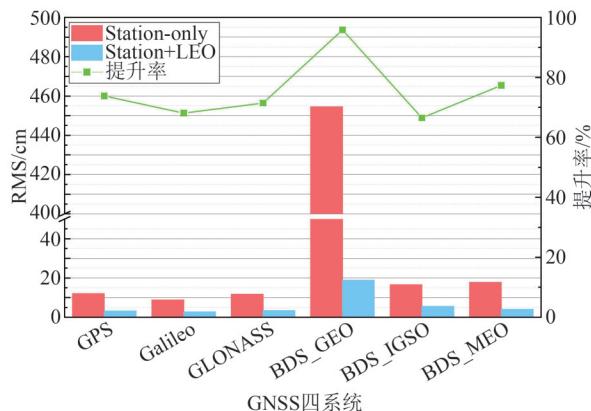


图5 GNSS四系统轨道解算精度及提升率

Fig. 5 Precision and Improvement Rates in Orbit Determination for GNSS Four-System

图6展现了在仅地面站情况下与加入LEO卫星充当天基监测站情况下GNSS卫星钟差解算精度及有效率。在钟差精度方面,加入LEO之后对GNSS卫星并无增强效果,MEO卫星钟差差异在正常波动范围内,GEO和IGSO精度出现

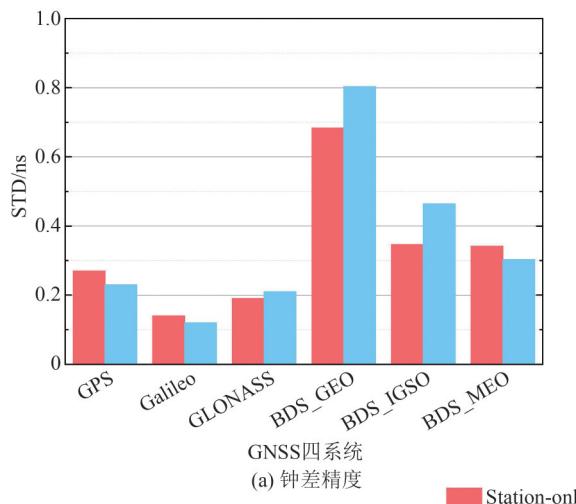


图6 GNSS四系统钟差解算精度及有效率

Fig. 6 Precision and Availability of Clock Offset Determination for GNSS Four-System

为反映加入LEO之后解算的精密产品对精密应用的性能提升,统计了两种情况下的SISRE,如图7所示。加入LEO卫星之后,IGSO和MEO卫星SISRE均得到改善,均优于10 cm,这与前面的轨钟精度分析结果一致。BDS_GEO卫星SISRE值出现了略微降低,这是因为BDS_GEO卫星轨道精度改善主要来自于切向及法向,而SISRE计算主要依赖轨道径向精度,且钟差精度出现了略微降低的现象。

综上,加入LEO卫星,所有GNSS均可实现全弧段跟踪。由于LEO卫星的高动态特性,GNSS卫星轨道精度提升明显,GEO卫星可达

了略微降低,这可能是因为仿真的LEO钟差并不真实地反映钟差特性,解算钟差时LEO卫星钟差和GNSS钟差存在耦合关系导致的。在钟差有效率方面,在仅地面站情况下,BDS GEO和IGSO卫星可以获得较高的有效率,MEO卫星仅能获得40%左右的有效率,在加入LEO卫星后,所有卫星均可获得100%的钟差有效率。

表5 GNSS四系统轨道解算精度及提升率

Tab. 5 Orbit Determination Precision and Improvement Rates for GNSS Four-System

卫星系统	解算精度/cm		提升率/%
	Station-only	Station+LEO	
GPS	12.1	3.2	74
Galileo	8.8	2.8	68
GLONASS	11.8	3.4	71
BDS GEO	454.5	18.9	96
BDS IGSO	16.5	5.5	67
BDS MEO	17.7	4.0	77

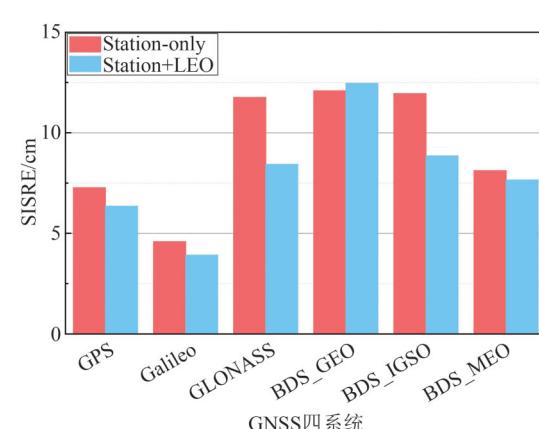
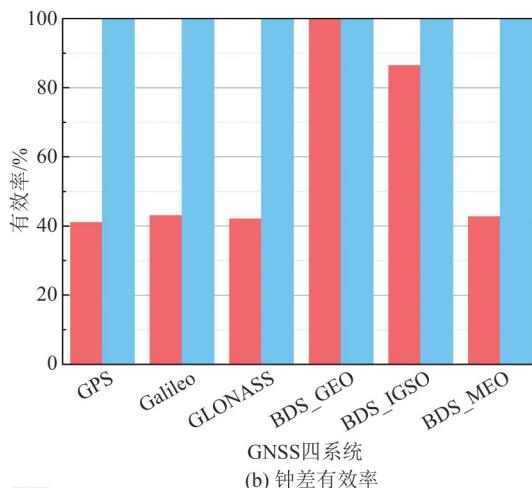


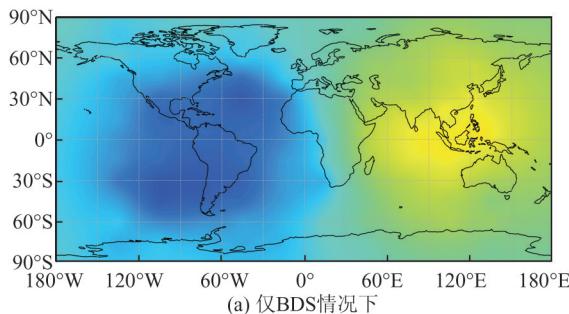
Fig. 7 SISRE Statistical Values for GNSS Four-System

到约 20 cm 的轨道精度, MEO 和 IGSO 卫星优于 5 cm。GNSS 卫星钟差精度无明显提升, 但有效率提升明显, 均可达到 100%, 这避免了区域监测网实现 GNSS 卫星钟差产品时的拟合过程, 有助于提升精密钟差产品的整体性能。对于 SISRE, 除 BDS_GEO 卫星, 均有明显改善。因此联合 LEO 进行 GNSS 精密产品解算有望获得更高精度的精密产品, 且克服了严重依赖地面站数量与分布的缺点。

3.3.2 用户侧性能评估结果

本节首先评估加入 LEO 卫星后对地面可视卫星数的提高效果, 进一步研究 LEO 对用户侧的增强效果, 分析仅 BDS 系统和 BDS+LEO 系统下 PPP 定位精度、收敛时间及 PDOP 值。PPP 解算策略如表 6 所示。

图 8 为仅 BDS 卫星系统和加入 LEO 卫星系统后的地面测站可视卫星数热力图, 其颜色越亮, 代表卫星数越多。可以看出, 仅 BDS 卫星系统情况下, 亚太区域有最优的观测条件, 其可视卫星数在 25 颗以上, 这是 BDS IGSO 和 GEO 卫星空间分布导致的。在加入 LEO 卫星后, 卫星可



(a) 仅 BDS 情况下

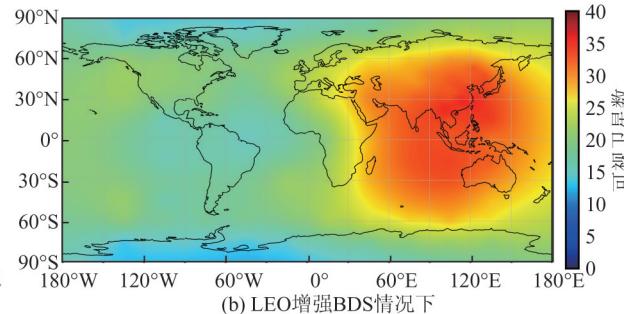


图 8 全球可视卫星数分布图

Fig. 8 Distribution Map of Global Visible Satellites

分析 LEO 对 PPP 收敛时间增强效果, 设置收敛条件为 N、E、U、3D 方向连续 10 个历元以上定位精度均优于 10 cm。图 9 展示了 24 个测站 BDS+LEO 相较于 BDS 单系统的 PPP 收敛时间及提升率, 可见加入 LEO 后所有测站收敛性能提升明显。分析 LEO 对 BDS 定位精度提升效果, 图 10 为 BDS 单系统和加入低轨星座后为各测站 PPP 在 N、E、U 方向的定位精度及提升率。

表 7 为 PPP 收敛时间及提升率。由表 7 可以看出, BDS 在 N、E、U 及 3D 方向收敛时间分别为 19.6、21.5、27.7 及 34.9 min, BDS+LEO 分别为 6.9、6.8、8.6 及 9.2 min, 由此可见, 加入 LEO 星座对 PPP 收敛时间减少效果显著, 其中 N、E、U 及 3D 方向的提升率分别为 64%、68%、

见数总体上有明显的提高, 全球范围的卫星可见数普遍都在 15 颗以上, 尤其是在亚太地区, 卫星可见数量在 35 颗左右。特别是在中纬度地区, 卫星可见性的增强效果显著, 而极地地区的增强效果并不是很明显。这是由于本次评估中卫星轨道倾角为 48°, 其倾角较低, 使得中低纬度的增强效果明显。

表 6 PPP 解算策略

Tab. 6 Processing Strategy for Precise Point Positioning

类型	数据处理和模型描述
定位模式	静态双频 PPP
观测数据	BDS2/BDS3、LEO:B1I/B3I
电离层	BDS 和 LEO 均采用无电离层组合
对流层	均采用 SAAF+GMF 进行参数估计
采样间隔 / s	30
截止高度角 / (°)	7
卫星天线相位中心偏差	GNSS 采用 igs14.atx, LEO 不考虑
接收机天线相位中心偏差	不考虑
天线相位缠绕	模型改正
精密星历和钟差	仿真轨道钟差产品
参数估计	卡尔曼滤波

66% 和 71%。这得益于 LEO 卫星高动态的特性, 地面-卫星几何构型得到显著增强, 从而显著缩短了 PPP 收敛时间。

表 8 为 PPP 定位精度的 RMS 值。由表 8 可以看出, BDS 的 PPP 定位精度在 N、E、U 及 3D 方向分别为 0.97 cm、1.60 cm、1.82 cm 及 2.33 cm, BDS+LEO 的 PPP 定位精度分别为 0.38 cm、0.50 cm、1.27 cm 及 1.44 cm, BDS+LEO 的 PPP 精度明显优于 BDS 单系统的精度, 加入低轨星座后, N、E、U 及 3D 方向的定位精度分别提升了 57%、69%、28% 及 38%。对于高程方向提升效果明显低于平面方向, 这可能是由于本文选取的 LEO 星座倾角较低, 其与地面在平面方向相对移动速度更快导致的。

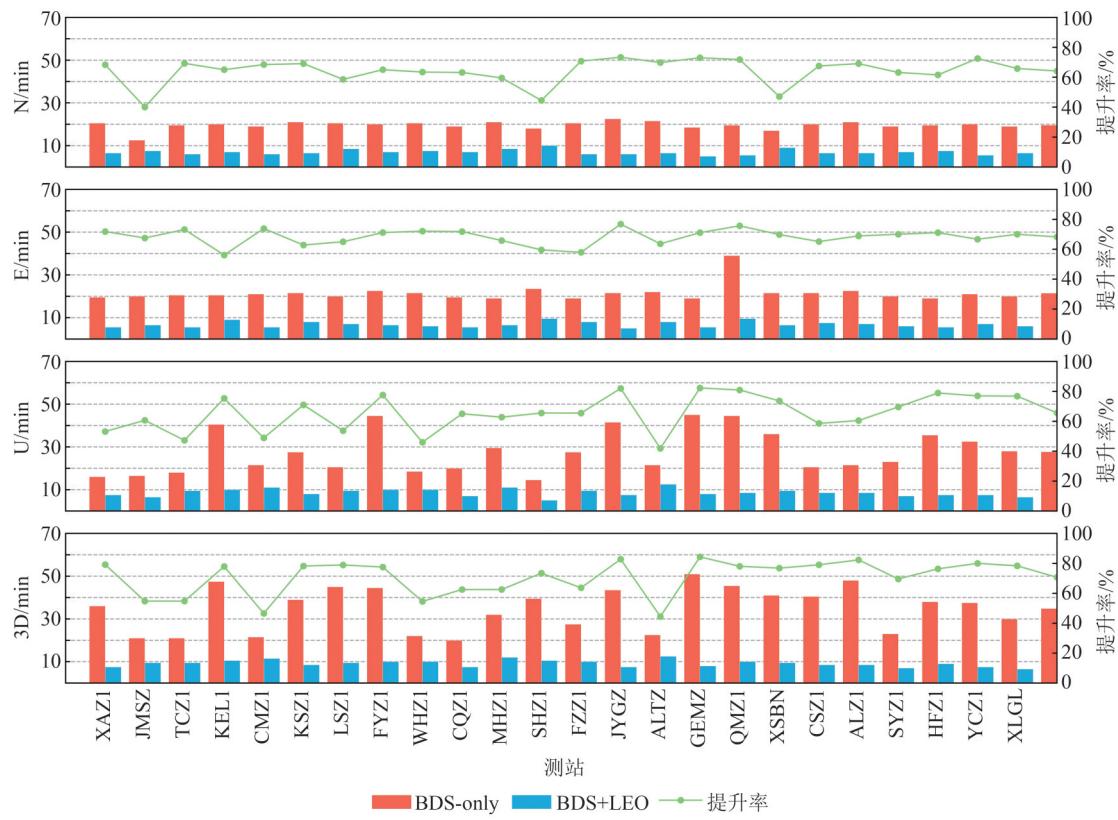


图9 24个测站PPP平均收敛时间及提升率

Fig. 9 PPP Convergence Time and Improvement Rate for 24 Stations

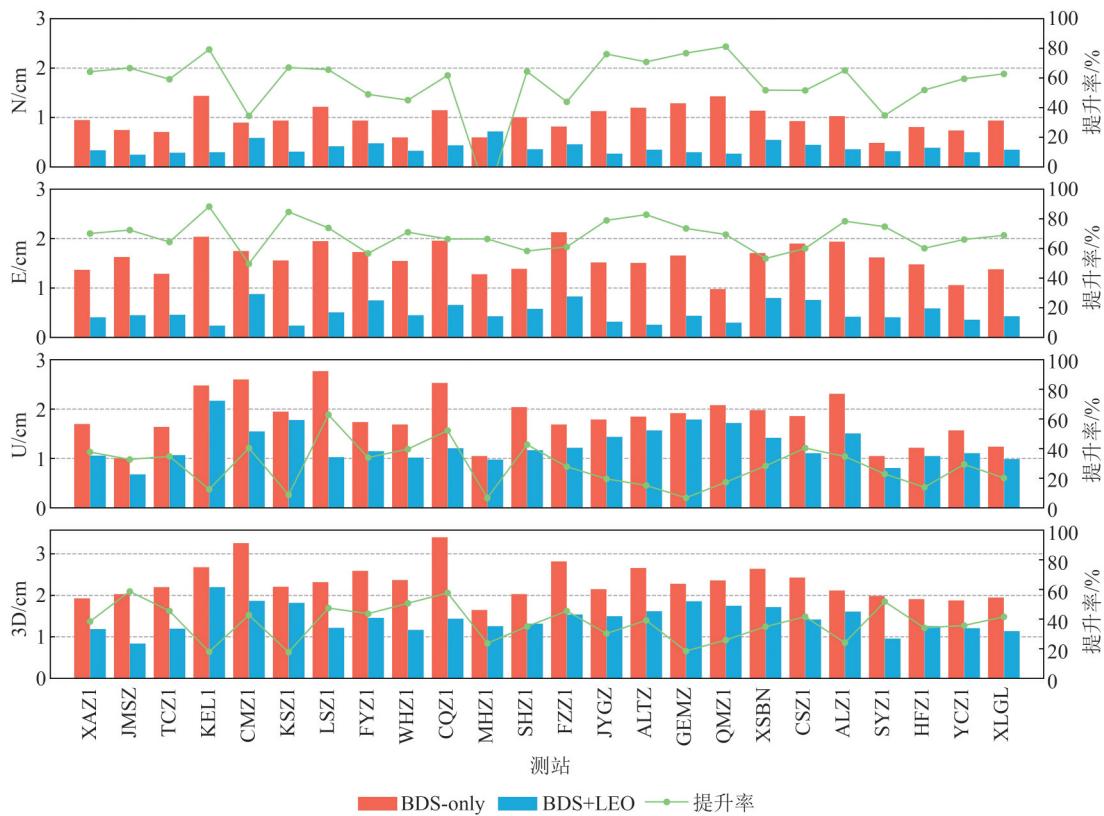


图10 24个测站PPP平均RMS及提升率图

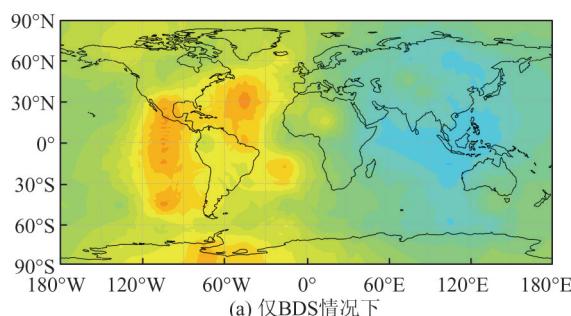
Fig. 10 PPP Average RMS and Improvement Rate for 24 Stations

表 7 24 个测站 PPP 平均收敛时间及提升率统计表
Tab. 7 PPP Convergence Time and Improvement Rate for 24 Stations

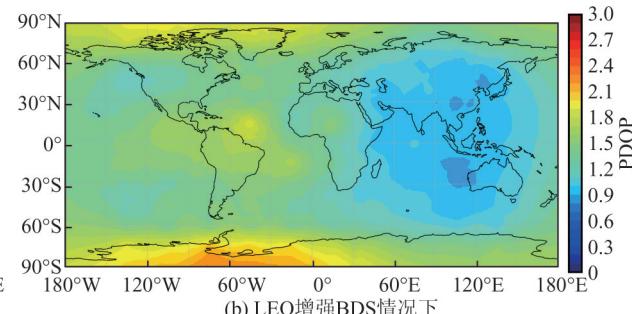
方向	平均收敛时间/min		提升率/%
	BDS-only	BDS+LEO	
N	19.6	6.9	64
E	21.5	6.8	68
U	27.7	8.6	66
3D	34.9	9.2	71

表 8 24 个测站 PPP 平均 RMS 及提升率统计表
Tab. 8 PPP Average RMS and Improvement Rate for 24 Stations

方向	平均 RMS/cm		提升率/%
	BDS-only	BDS+LEO	
N	0.97	0.38	57
E	1.60	0.50	69
U	1.82	1.27	28
3D	2.33	1.44	38



(a) 仅 BDS 情况下



(b) LEO 增强 BDS 情况下

图 11 全球 PDOP 分布图

Fig. 11 Distribution Map of Global PDOP

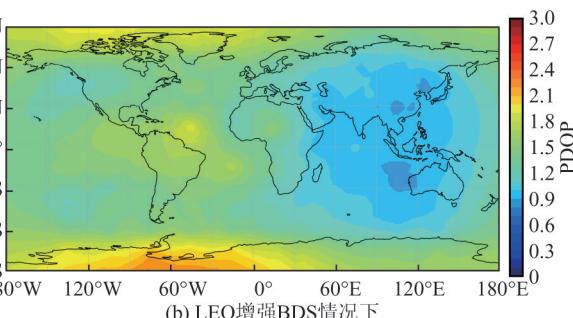
4 结 语

本文研究了低轨增强星座的轨道/钟差、星地/星载 GNSS 及星地 LEO 观测数据仿真算法,高逼真仿真了 Walker108/12/1 低轨星座,分析了 LEO 增强 BDS 全面性能评估方法,多方位评估了低轨星座对中国区域地面测站的增强效果。值得注意的是,虽然本文仿真数据考虑了诸多误差,但是与实测数据可能仍有偏差,本文性能水平是在仿真场景下实现的较为理想的结果。

纳入 LEO 作为 BDS 增强系统之后,在地面测站难以全球分布情况下,可实现对所有 GNSS 的全弧段跟踪。GNSS 卫星轨道精度和钟差有效率提升明显,IGSO 和 MEO 卫星轨道精度优于 5 cm,提升率在 60%~80%,GEO 卫

对 BDS 和 BDS+LEO PPP 全球 PDOP 进行了统计,如图 11 所示,在加入 LEO 前,由于 BDS 部署在亚太地区上空的 GEO 和 IGSO 卫星,亚太地区的 PDOP 值低于全球其他地区,平均在 1.0 左右,其他地区在 2.1 左右。加入低轨星座后,亚太地区的 PDOP 值平均小于 1,全球 PDOP 值降至 1.3 左右且较均匀。除极地外,全球 PDOP 都有一定幅度的降低,这是由于本文选取的 LEO 星座轨道倾角为 48°,对低纬度地区增强效果较好,这与可视卫星数分析结果一致。

综上,加入 LEO 卫星后,全球范围内可见卫星数有明显增加,达 15 颗以上。PPP 收敛性能提升明显,N、E、U 及 3D 方向收敛时间均优于 10 min。定位精度在 N、E、U 及 3D 方向分别提升了 57%、69%、28% 及 38%。PPP PDOP 值方面,中低纬度地区降低显著,亚太地区优于 1,增强效果明显。



星由米级定轨精度提升至 20 cm 左右,提升率达 96%。钟差有效率提升至 100%,避免了钟差拟合加密的过程。

LEO 作为导航增强星座而言,可显著提高地面用户可视卫星数。PPP 定位精度在 E、N、U 及 3D 方向分别为 0.38、0.50、1.27 及 1.44 cm,收敛时间均优于 10 min,相对仅 BDS 提升效果明显。

低轨星座对 GNSS 系统侧和用户侧均有显著增强效果。该研究可有效应用于 LEO 增强系统设计和性能评估,并提供理论支撑。

参 考 文 献

- [1] Wang Mi, Wu Qianyu, Xiao Jing, et al. Key Technologies on “Cloud-Edge-End” Collaborative Intelligent Service of Low-Orbit Giant Constellation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(10): 1213-1220.

- versity, 2023, 48(8): 1256–1263. (王密, 仵倩玉, 肖晶, 等. 低轨巨型星座遥感信息“云-边-端”智能服务关键技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1256–1263.)
- [2] Keller H, Salzwedel H. Link Strategy for the Mobile Satellite System Iridium [C]//IEEE Vehicular Technology Conference, Atlanta, USA, 2002.
- [3] Reid T G, Neish A M, Walter T F, et al. Leveraging Commercial Broadband LEO Constellations for Navigating [C]//The 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, Oregon, USA, 2016.
- [4] Zhang Xiaohong, Ma Fujian. Review of the Development of LEO Navigation-Augmented GNSS [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(9): 1073–1087. (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.)
- [5] “China Star Network” Established! [EB/OL]. [2023-08-28]. <https://rfic.cuit.edu.cn/info/2095/1173.html>. (“中国星网”成立! [EB/OL]. [2023-08-28]. <https://rfic.cuit.edu.cn/info/2095/1173.html>.)
- [6] “China BeiDou in the New Era” White Paper Full Text [EB/OL]. (2022-11-04) [2023-08-28]. http://www.beidou.gov.cn/zt/xwfbh/xsddzgb/ gdxw11/202211/t20221104_24806.html. (《新时代的中国北斗》白皮书全文[EB/OL]. (2022-11-04) [2023-08-28]. http://www.beidou.gov.cn/zt/xwfbh/xsddzgb/ gdxw11/202211/t20221104_24806.html.)
- [7] Michalak G, Glaser S, Neumayer K H, et al. Precise Orbit and Earth Parameter Determination Supported by LEO Satellites, Inter-Satellite Links and Synchronized Clocks of a Future GNSS [J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68(12): 4753–4782.
- [8] Yang Yufei, Yang Yuanxi, Xu Junyi, et al. Navigation Satellites Orbit Determination with the Enhancement of Low Earth Orbit Satellites [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 46–52. (杨宇飞, 杨元喜, 徐君毅, 等. 低轨卫星对导航卫星星座轨道测定的增强作用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(1): 46–52.)
- [9] Joerger M, Gratton L, Pervan B, et al. Analysis of Iridium-Augmented GPS for Floating Carrier Phase Positioning [J]. *Annual of Navigation*, 2010, 57(2): 137–160.
- [10] Li X, Ma F, Li X, et al. LEO Constellation-Augmented Multi-GNSS for Rapid PPP Convergence [J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 93(5): 749–764.
- [11] Enge P K, Ferrell B, Bennett J, et al. Orbital Diversity for Satellite Navigation [C]//The 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012), Nashville, TN, USA, 2012.
- [12] Reid T G R, Neish A M, Walter T, et al. Broadband LEO Constellations for Navigation [J]. *Navigation*, 2018, 65(2): 205–220.
- [13] Zhao Zhibo, Ren Xiaodong, Zhang Xiaohong, et al. Regional Ionospheric Modeling and Accuracy Assessment Using GNSS/LEO Satellites Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(2): 262–269. (赵智博, 任晓东, 张小红, 等. 联合GNSS/LEO卫星观测数据的区域电离层建模与精度评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(2): 262–269.)
- [14] Zhang T J, Shen H X, Li Z, et al. Restricted Constellation Design for Regional Navigation Augmentation [J]. *Acta Astronautica*, 2018, 150: 231–239.
- [15] Tian Ye, Zhang Lixin, Bian Lang. Design of LEO Satellites Augmented Constellation for Navigation [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2019, 39(6): 55–61. (田野, 张立新, 边朗. 低轨导航增强卫星星座设计[J]. 中国空间科学技术, 2019, 39(6): 55–61.)
- [16] Nie Xin, Zheng Jinjun, Fan Benyao. Study on Development of Technology Path for LEO Satellite Navigation System [J]. *Spacecraft Engineering*, 2022, 31(1): 116–124. (聂欣, 郑晋军, 范本尧. 低轨卫星导航系统技术发展研究[J]. 航天器工程, 2022, 31(1): 116–124.)
- [17] Huang W, Männel B, Sakic P, et al. Integrated Processing of Ground- and Space-Based GPS Observations: Improving GPS Satellite Orbits Observed with Sparse Ground Networks [J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(10).
- [18] Li X, Zhang K, Meng X, et al. LEO - BDS - GPS Integrated Precise Orbit Modeling Using FengYun-3D, FengYun-3C Onboard and Ground Observations [J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(2).
- [19] Li X, Zhang K, Ma F, et al. Integrated Precise Orbit Determination of Multi-GNSS and Large LEO Constellations [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(21).
- [20] Li B, Ge H, Ge M, 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.
- [21] Zeng Tian, Sui Lifen, Jia Xiaolin, et al. Simulation

- of Combined Orbit Determination with a Small LEO Constellation and BDS-3 Full Constellation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(1): 61–68. (曾添, 隋立芬, 贾小林, 等. 小型化 LEO 星座与 BDS-3 全星座联合定轨仿真[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(1): 61–68.)
- [22] Wang Lei, Chen Ruizhi, Li Deren, et al. Quality Assessment of the LEO Navigation Augmentation Signals from Luojia-1A Satellite[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2191–2196. (王磊, 陈锐志, 李德仁, 等. 珞珈一号低轨卫星导航增强系统信号质量评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2191–2196.)
- [23] Wu Z, Yu B, Sheng C, et al. In-flight Performance Analysis of the Navigation Augmentation Payload on LEO Communication Satellite: A Preliminary Study on WT01 Mission [J]. *Geo-spatial Information Science*, 2022, 25(1): 88–103.
- [24] He Yanwei. Design of LEO Constellation and Enhanced BDS-3 Analysis[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022. (贺延伟. 低轨星座设计及增强北斗三号分析[D]. 西安: 长安大学, 2022.)
- [25] 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.
- [26] Su M, Su X, Zhao Q, et al. BeiDou Augmented Navigation from Low Earth Orbit Satellites[J]. *Sensors*, 2019, 19(1): 198.
- [27] Ma F, Zhang X, Hu J, et al. Frequency Design of LEO-Based Navigation Augmentation Signals for Dual-band Ionospheric-Free Ambiguity Resolution [J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(2): 53.
- [28] Wang Le, She Haonan, Wang Haohao, et al. BDS Real-Time Precise Orbit and Clock Offset Products Solution Strategy and Accuracy Evaluation [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2020, 7(5): 37–44. (王乐, 折浩男, 王浩浩, 等. 北斗实时精密轨道和钟差产品解算策略及精度评定[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(5): 37–44.)
- [29] Huang Guanwen. Research on Algorithms of Precise Clock Offset and Quality Evaluation of GNSS Satellite Clock [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (黄观文. GNSS 星载原子钟质量评价及精密钟差算法研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.)
- [30] Chen L, Jiao W, Huang X, et al. Study on Signal-in-Space Errors Calculation Method and Statistical Characterization of BeiDou Navigation Satellite System [C]//China Satellite Navigation Conference, Shanghai, China, 2013.
- [31] Heng L, Gao G, Walter T, et al. Statistical Characterization of GPS Signal-in-Space Errors [C]// International Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, USA, 2012.
- [32] Delgado N, Nunes F, Seco-Granados G. On the Relation Between GDOP and the Volume Described by the User-to-Satellite Unit Vectors for GNSS Positioning [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(3): 1139–1147.
- [33] Yan X, Liu C, Huang G, et al. A Priori Solar Radiation Pressure Model for BeiDou-3 MEO Satellites [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(13): 1605.
- [34] Montenbruck O, Steigenberger P, Hugentobler U. Enhanced Solar Radiation Pressure Modeling for Galileo Satellites [J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 89(3): 283–297.
- [35] Zhao Qile, Liu Jingnan, Ge Maorong, et al. Precise Orbit Determination of GPS and CHAMP Satellites with PANDA Software [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 2005, 25(2): 113–116. (赵齐乐, 刘经南, 葛茂荣, 等. 用 PANDA 对 GPS 和 CHAMP 卫星精密定轨[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(2): 113–116.)