



小型化LEO星座与BDS-3全星座联合定轨仿真

曾添, 隋立芬, 贾小林, 肖国锐, 戴卿, 甘雨

引用本文:

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.

ZENG Tian, SUI Lifen, JIA Xiaolin, et al. [Simulation of Combined Orbit Determination with a Small LEO Constellation and BDS3 Full Constellation](#)[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(1): 61–68.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[联合GNSS/LEO卫星观测数据的区域电离层建模与精度评估](#)

Regional Ionospheric Modeling and Accuracy Assessment Using GNSS/LEO Satellites Observations

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(2): 262–269,295 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190252>

[一种顾及IGS-RTS数据接收中断的厘米级星载GPS实时定轨方法](#)

A Centimeter–Level Real–Time Orbit Determination Method Using Space–Borne GPS Measurements Considering IGS–RTS Data Receiving Interruption

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(11): 1620–1626 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200432>

[一种使用抗差估计的保护水平重构方法](#)

A Method of Protection Level Reconstruction Based on Robust Estimation

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(1): 96–102 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190043>

[BDS/QZSS及其组合系统在中国和日本及周边地区的定位性能评估](#)

Positioning Performance Evaluation of BDS/QZSS and Its Combined Systems in China, Japan and Their Peripheral Areas

武汉大学学报 · 信息科学版. 2020, 45(4): 574–585,611 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180228>

[使用抛物面定向天线分析北斗三号星上伪距和载波测距偏差](#)

Analysis of Pseudorange and Carrier Ranging Deviation of BDS–3 Using Parabolic Directional Antenna

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(9): 1298–1308 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200182>

DOI:10.13203/j.whugis20190426



文章编号:1671-8860(2022)01-0061-08

小型化LEO星座与BDS-3全星座联合定轨仿真

曾添^{1,2,3}隋立芬¹贾小林²肖国锐¹戴卿¹甘雨⁴

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

2 地理信息工程国家重点实验室,陕西 西安,710054

3 93216部队,北京,100085

4 湖南北斗微芯产业发展有限公司,湖南 长沙,410000

摘要:受限于区域监测站及地球静止轨道(geosynchronous earth orbit, GEO)卫星的静地特性,北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)定轨精度较差,加入低轨卫星(low earth orbit, LEO)星载数据可显著提升定轨精度。使用一种由24颗LEO卫星组成的小型低轨卫星星座,在BDS-3全星座情况下,仿真分析了导航卫星与低轨卫星联合定轨对北斗卫星轨道的提升程度。分别进行仅地面测站定轨、地面测站与LEO联合定轨试验,包含全球均匀、亚太区域、亚海分布3类测站布局。结果表明:(1)仅地面测站定轨时,GEO卫星轨道三维精度在分米量级,加入LEO观测数据后,定轨精度在厘米量级,提升程度达80%以上;(2)区域地面测站时,导航卫星轨道三维精度在分米量级,加入LEO卫星后,所有类型导航卫星定轨精度均提升至数个厘米,提升效果显著;(3)全球均匀测站时,LEO的加入仍然可提升倾斜地球同步轨道/中高轨道卫星定轨精度,提升效果在毫米至厘米量级。

关键词:北斗三号;低轨卫星;区域测站布局;联合定轨;星座仿真

中图分类号:P228

文献标志码:A

北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)全球星座已经完成组网工作。由于受地理和政治因素等影响,用于维护系统正常运行与监控的地面测站仅能在国内区域布设。区域布设的地面测站无法对中高轨道卫星(medium earth orbit, MEO)进行全弧段跟踪。此外,BDS星座相比全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)星座,还包含地球静止轨道(geosynchronous earth orbit, GEO)卫星,其相对于地面测站静止,地面观测几何结构弱,由此会带来较大的电离层、对流层等系统误差^[1],导致GEO卫星定轨精度较差。

区域测站布局影响运控定轨的问题可使用低轨卫星(low earth orbit, LEO)辅助导航卫星精密定轨增强^[2]来解决。21世纪初,随着越来越多LEO卫星发射计划的提出,国际GNSS服务组织(International Global Navigation Satellite System Service, IGS)于2002年成立了LEO工作组,其

中,包括研究LEO/地面测站联合定轨算法。此后,多位学者进行了相关研究,包括联合LEO/激光和DORIS整体解算^[3-4]、对地球自转参数的改进^[5]、对地心坐标解算的改进^[6]等。在6个国内测站下,加入3颗LEO星载全球定位系统(global positioning system, GPS)观测数据,轨道精度提升幅度达70%^[7]。中国于2013年发射的极轨气象卫星风云3号C星搭载了GPS/BDS双模接收机,区域测站联合该颗卫星观测数据对GPS/BDS定轨,北斗的GEO卫星轨道精度提升幅度达80%^[8-10]。针对LEO星座对导航卫星的增强,使用铱星星座表明,用户同时接收来自GNSS/LEO的导航信号时,精密定位的收敛时间可提升至5 min^[11];多种LEO星座用于增强GNSS用户进行快速精密定位的分析表明,使用载波相位观测量定位收敛时间可提升至3 min^[12]。

随着LEO个数的增多,导航卫星的定轨精度提升越来越小。如果使用通信领域的大型LEO

收稿日期:2020-04-19

项目资助:地理信息工程国家重点实验室基金(SKLGIE2018-M-2-1);国家自然科学基金(41674016,41874041,41904039)。

第一作者:曾添,博士,工程师,研究方向为GNSS精密定轨与定位。tattian@126.com

星座进行增强,存在部署周期长、LEO卫星分布不均匀、卫星管控困难等问题。本文仿真了一种由24颗卫星组成的小型LEO星座,并对北斗三代卫星进行了星座仿真和联合定轨实验验证。

1 星座仿真

1.1 LEO星座

LEO星座的选取需要给定约束条件,如轨道交点周期、回归圈数、回归周期等。一个回归周期内卫星运行的圈数N为:

$$N = \frac{2\pi(R_e)}{l(1-\eta)} \quad (1)$$

式中, R_e 为地球平均赤道半径, $R_e=6378.14$ km; l 、 η 分别表示相邻轨迹之间间隔、轨迹覆盖重叠率。考虑重力场中的摄动项 J_2 对交点周期的影响, 可得星下点连续两次通过同一标准纬圈即交点周期 T_φ 的公式为:

$$T_\varphi = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} \left[1 - 1.5J_2 \left(\frac{R_e}{a} \right)^2 (3 - 4 \sin^2 i) \right] \quad (2)$$

式中, μ 为地球引力常数; a 、 i 分别为轨道半长轴、轨道倾角。由式(2)可知, 交点周期主要取决于半长轴, 轨道倾角的影响较小。由此可得回归轨道的条件为:

$$D = N \frac{T_\varphi(\omega_e - \dot{\Omega})}{2\pi} \quad (3)$$

式中, D 为整数; ω_e 为地球自转角速度; $\dot{\Omega}$ 为升交点赤经变化率。选定的LEO轨道参数有轨道半长轴(7154.44 km)、轨道倾角(98.498°)、偏心率(0.001 031 1)。在该轨道下的卫星, 回归周期为26 d, 回归圈数为373圈, 交点周期为6 022.5 s, 即卫星每天运行 $19\frac{9}{26}$ 圈。在上述条件下, 得到Walker 24/6/1(卫星数量/轨道面数量/相位因子)构型, 基于Walker星座可以得到所有LEO卫星的余下3个轨道根数信息, 其中, 近地点角距为0°, 其余升交点赤经、平近点角见表1。

1.2 BDS/GPS卫星星座

选取GPS、BDS两类导航星座进行实验分析。因为GPS卫星已全星座运行, 所以直接使用IGS提供的精密星历得到GPS卫星的初轨信息。选取BDS-3的卫星星座进行导航星座仿真, BDS-3基本空间星座由3颗GEO、3颗倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit, IGSO)和24颗MEO卫星组成。GEO卫星轨道高度35 786 km, 分别定点于80°E、110.5°E和140°E, 卫

表1 LEO星座轨道数/(°)

Tab.1 LEO Constellation Orbital Element/(°)

卫星号	升交点赤经	平近点角	卫星号	升交点赤经	平近点角
L01	60	0	L13	240	45
L02	60	90	L14	240	135
L03	60	180	L15	240	225
L04	60	270	L16	240	315
L05	120	15	L17	300	60
L06	120	105	L18	300	150
L07	120	195	L19	300	240
L08	120	285	L20	300	330
L09	180	30	L21	0	75
L10	180	120	L22	0	165
L11	180	210	L23	0	255
L12	180	300	L24	0	345

星编号假定为C01~C03; IGSO卫星轨道高度35 786 km, 轨道倾角55°, 其升交点赤经为118°E, 卫星编号假定为C04~C06; MEO卫星轨道高度21 528 km, 轨道倾角55°, 构型为Walker 24/3/2(卫星数量/轨道面数量/相位因子), 卫星编号假定为C07~C30。图1和图2分别绘制了使用卫星工具包软件得到的BDS/LEO星座的三维和二维整体仿真情况。

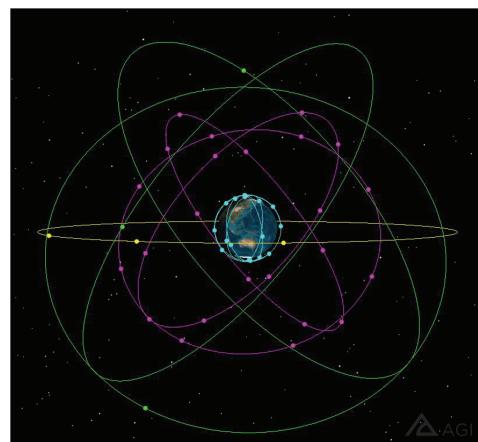


图1 BDS/LEO星座三维仿真情况

Fig.1 BDS/LEO Constellation 3D Simulation

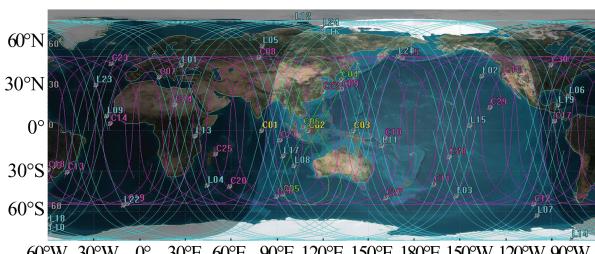


图2 BDS/LEO星座二维仿真情况

Fig.2 BDS/LEO Constellation 2D Simulation

1.3 观测数据仿真

观测数据的仿真原理本质上是组建观测方程的逆过程。在进行定位时,卫星轨道和钟差已知,依据地面测站观测量,改正伪距相位在卫星端、接收机端和传播路径中的各项误差,得到测站位置和接收机钟差。而在观测仿真中,测站的位置和钟差为已知值,联合轨道及误差改正模型,得到符合实际情况的观测值。假定非差伪距、相位观测方程为:

$$\begin{cases} P_{r,i}^{s,Q} = \mathbf{u}_r^{s,Q}(\mathbf{o}^{s,Q} - \mathbf{r}_r) + c\delta t_r - c\delta t^{s,Q} + \\ m_r^{s,Q}T_r + \gamma_i^Q I_{r,1}^{s,Q} + B_{r,i}^Q - B_i^{s,Q} + \epsilon_{r,i}^{s,Q} \\ L_{r,i}^{s,Q} = \lambda_i^Q \varphi_{r,i}^{s,Q} = \mathbf{u}_r^{s,Q}(\mathbf{o}^{s,Q} - \mathbf{r}_r) + c\delta t_r - c\delta t^{s,Q} + \\ m_r^{s,Q}T_r - \gamma_i^Q I_{r,1}^{s,Q} + \lambda_i^Q(N_{r,i}^{s,Q} + b_{r,i}^Q - b_i^{s,Q}) + \xi_{r,i}^{s,Q} \end{cases} \quad (4)$$

式中, i, r, s, Q 分别为频率标志、测站标志、卫星标志、导航系统标志; $\mathbf{o}^{s,Q}$ 和 \mathbf{r}_r 分别为卫星和接收机质心坐标; \mathbf{u} 为站星视线向量; c 为光速; P 为伪距观测量; L 、 φ 分别为以 m、周为单位的相位观测量; δt_r 、 $\delta t^{s,Q}$ 分别为接收机钟差(s)、卫星钟差(s); T_r 、 $I_{r,1}^{s,Q}$ 分别为对流层延迟(m)、电离层延迟(m); $m_r^{s,Q}$ 为测站天顶至站星方向的对流层延迟映射函数; γ_i^Q 为电离层延迟系数; $N_{r,i}^{s,Q}$ 为模糊度(周); $B_{r,i}^Q$ 、 $B_i^{s,Q}$ 为接收机端、卫星端伪距硬件延迟(m); $b_{r,i}^Q$ 、 $b_i^{s,Q}$ 为接收机端、卫星端载波相位硬件延迟(周); $\epsilon_{r,i}^{s,Q}$ 、 $\xi_{r,i}^{s,Q}$ 为观测误差(m)。需要注意不同导航系统之间还存在系统间偏差参数,与测站相关。仿真的具体流程为:

1) 获取真实卫星轨道。进行星座仿真时可获得每颗卫星的轨道 6 根数,由初轨进行轨道积分,给定 GNSS 和 LEO 的相关摄动力模型如表 2 所示。其中,低轨卫星的太阳光压模型为 Box-Wing 模型,弧段长度为 1 d,得到该弧段的轨道及状态转移矩阵和敏感矩阵信息,该轨道文件即当作真实无误差的轨道。

2) 得到用于仿真观测数据的轨道。首先,使用真实的轨道得到初轨,为加入力模型误差,将 MEO 卫星的重力模型阶数取 5×5 阶,高轨道卫星(IGSO、GEO)的阶数取 3×3 阶,低轨卫星的重力场模型阶数取 60×60 阶,其余的力模型信息与表 2 相同;然后,积分得到一天弧段的轨道,将该轨道与真实的轨道进行拟合,获得拟合以后的初轨信息;最后,进行轨道积分得到 GPS、BDS、LEO 卫星的轨道,该轨道文件用于观测数据的仿真。

3) 仿真地面测站和 LEO 观测数据。选取

IGS 全球共约 100 个地面测站,取 SNX 文件作为测站真实坐标。上文已得到 GNSS/LEO 卫星在任意时刻的卫星位置。则在某一时刻,由地面测站/LEO 坐标 \mathbf{r}_r 、GNSS 卫星坐标 $\mathbf{o}^{s,Q}$ 的真实无误差位置,可得该历元真实的站星距 ρ 。加入相应的误差项,包括卫星端、接收机端、传播路径。其中,卫星端包括卫星钟差、卫星天线相位中心误差(GPS 使用 igs14.atx 文件,BDS 假定为 0)、天线相位缠绕,接收机端包括接收机钟差、接收机天线相位中心误差(地面测站 GPS 使用 igs14.atx 文件,BDS 与 GPS 一致,LEO 卫星假定为 0)、潮汐误差(固体潮、海潮、极潮);传播路径包括测站天顶对流层延迟(仅地面测站)、地球自转、相对论效应等,因为定轨时使用消电离层组合观测模型,所以不考虑电离层延迟误差。钟差数据使用 IGS 发布的最终产品作为仿真值,其中,GPS 的钟差使用相应的钟差值,BDS 钟差使用 GPS 钟差代替。地面测站使用相应的接收机钟差值,LEO 卫星使用地面测站的钟差代替,对流层延迟使用的是 SAAS 模型得到的值,仿真的频点 GPS 为 L1、L2,BDS 为 B1、B2。加入伪距、相位观测量的观测误差,每个频点均分别为 1 m、5 mm,并假定服从零均值正态分布。仿真时间假定为 2019-06-29—2019-07-05 共 7 d 的时段,仿真得到地面测站、低轨卫星的星载 GNSS 观测数据。

表 2 仿真轨道的力模型信息

Tab. 2 Force Model Information of Simulated Orbits

力模型项	策略
地球重力场	EGM2008, 导航星: 10×10 阶; LEO: 120×120 阶
N 体引力	DE405 星历
固体、海、极潮	IERS 协议
相对论效应	广义相对论
大气阻力	导航星: 不考虑; LEO: DTM94 模型, 每 360 min 估算一组
太阳光压	导航星: CODE 5 参数模型; LEO: Box-Wing 模型
经验力	导航星: 不考虑; LEO: RTN 6 周期性经验力, 每 120 min 估算一组
地球辐射压	不考虑

2 结果与分析

首先,分析在仅使用地面测站进行定轨时导航卫星的定轨结果;然后,分析加入 LEO 卫星后 LEO 与地面测站观测数据联合定轨的结果。定轨时段与观测数据仿真时段一致,共 7 d, 具体定轨策略如表 3 所示,力模型信息与表 2 一致,定轨

弧段为1 d。使用仿真数据定轨得到的卫星轨道与仿真观测数据时使用的真实轨道进行比较,得到每个弧段定轨精度统计的均方根误差(root mean square error, RMSE),取所有弧段的均值得到一种方案下的整体定轨结果。选取的地面测站分布如图3所示,包括全球均匀分布的80个、50个测站,分别对应图3(a)中的红+黄、红;亚海分布25个测站(亚太20个及亚太以外5个全球测站)、亚太区域20个测站,分别对应图3(b)中的红+黄、红。

表3 卫星精密定轨策略

Tab. 3 Processing Strategy of GNSS Precise Orbit Determination

观测数据	LC、PC 非差无电离层组合
相位模型	GPS 及地面站: igs14.atx; BDS 及 LEO: 假定为 0
截止高度角	地面站 7°, LEO 0°
对流层延迟	地面站: SAAS 模型 + 过程噪声, 天顶方向每 2 h 估算一次, 水平梯度每天 1 个; LEO 无需改正
模糊度参数	地面站部分固定; LEO 浮点解
钟差处理	白噪声, 接收机钟差选一地面站固定为参考钟
定轨采样间隔	300 s
测站坐标	SNX 周解, 强约束

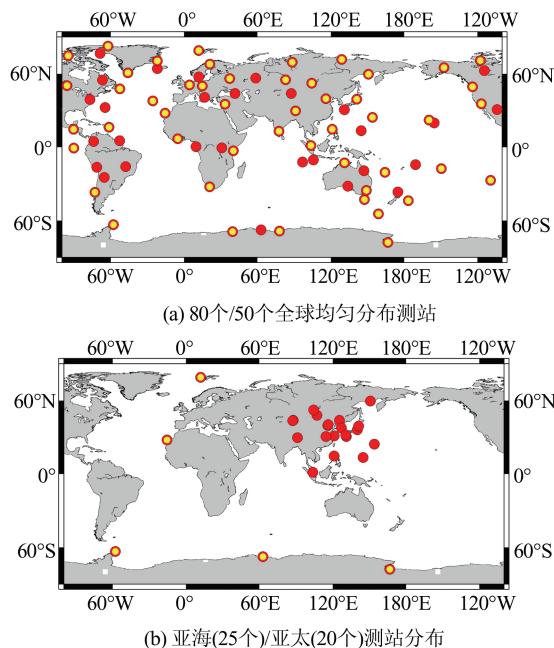


图3 地面测站分布

Fig.3 Distribution of Ground Stations

2.1 仅地面测站定轨

选取全球均匀分布的80个测站、亚海分布的25个测站、亚太区域20个测站3种测站布局分别进行BDS单系统和BDS/GPS双系统定轨,地面测站在切向、法向、径向、三维方向上的RMSE定轨结果如图4所示。

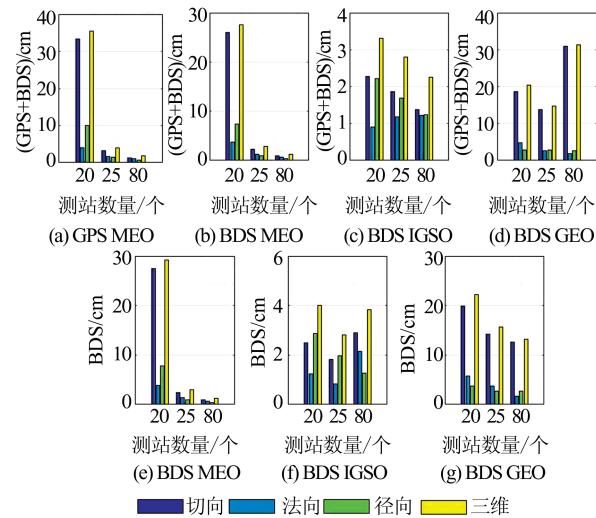


图4 仅地面测站定轨结果

Fig.4 Results of Precise Orbit Determination with Only Ground Stations

1) 仅地面测站定轨时,80个地面测站下BDS单系统定轨精度MEO、IGSO、GEO卫星三维RMSE分别为1.2 cm、3.8 cm、13.1 cm,BDS和GPS双系统定轨精度则分别为1.2 cm、2.3 cm、31.3 cm。GEO卫星定轨精度在全球均匀测站布局时仍然较差,在分米量级。

2) 对于亚海分布25个测站,BDS的MEO、IGSO、GEO卫星三维RMSE分别为2.9 cm、2.8 cm、15.7 cm,双系统下则分别为2.8 cm、2.8 cm、14.7 cm,MEO定轨精度由1.2 cm下降至2.9 cm,这是由于地面测站分布不均匀导致MEO跟踪弧段不充分,影响了定轨精度。

3) 对于亚太20个测站,BDS的MEO、IGSO、GEO卫星三维RMSE分别为29.3 cm、4.0 cm、22.2 cm,双系统下分别为27.7 cm、3.3 cm、20.4 cm,此时MEO定轨精度下降明显,达到分米级。由此可见,在区域测站情况下,导航卫星的定轨精度严重下降。为了保证系统安全,如果地面运控系统仅仅使用国内区域测站进行定轨,将极大降低发播的轨道产品,即广播星历的精度,尤其是对于MEO卫星。

2.2 LEO与地面测站联合定轨

2.2.1 仅 BDS3 系统

考虑加入低轨卫星观测数据时对BDS单系统定轨精度的提升,选取全球均匀80个测站、亚海分布25个测站,分别进行BDS、BDS联合4颗LEO定轨实验,定轨结果如图5所示,图5中BDS+4L表示BDS加4颗LEO联合定轨。

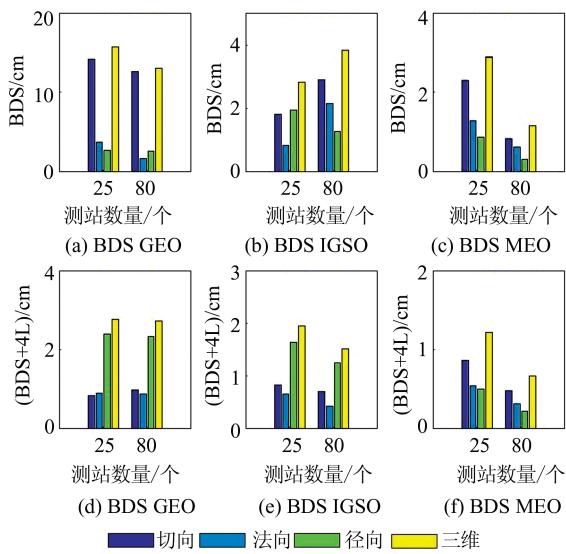


图 5 仅 BDS 联合定轨结果

Fig.5 Results of Combined Orbit Determination with only BDS Satellites

1) 仅地面测站定轨时,无论 80 或者 25 个地面测站观测数据, GEO 卫星的定轨精度三维 RMSE 均在分米量级, 分别为 13.1 cm、15.7 cm; 加入 4 颗 LEO 星载观测数据后, 定轨精度提升至 2.7 cm、2.8 cm, 精度提升最为显著。

2) 在 80 个地面测站下, 加入 4 颗 LEO 后, MEO 卫星三维定轨精度提升仍有数毫米, IGSO 卫星三维 RMSE 由 3.8 cm 提升至 1.5 cm; 25 个测站下加入 LEO 后, MEO、IGSO 卫星三维 RMSE 定轨精度分别由 2.9 cm、2.8 cm 提升至 1.2 cm、1.9 cm, 提升幅度在 1 cm 左右。

2.2.2 双系统

以全球均匀分布 80 个地面测站为例, 分析双系统定轨仿真结果。分别进行仅地面测站 BDS/GPS 定轨、加入 3 颗、24 颗 LEO 时 LEO 与 BDS/GPS 联合定轨, 共 3 种方案。导航卫星在 3 种方案下的定轨结果见图 6, 包括每颗卫星在径向、法向、切向上的定轨精度, 并按照轨道类型分类统计了 3 类卫星的平均定轨精度。GPS 包括 G01~G32 卫星, BDS 包括 C01~C30 卫星, 其中, C01~C06 是 GEO 和 IGSO 卫星。GC 表示 GPS 和 BDS 双系统定轨, GC+3L 表示 GC 加 3 颗 LEO 联合定轨, GC+6L 表示 GC 加 6 颗 LEO 联合定轨。横坐标按 GPS、BDS 的卫星号排序, 可通过递推获得未标出的卫星号。

GC+24L 联合定轨方案中第一个定轨弧段(年积日第 180 天)轨道比较的历元结果如图 7 所示。图 7 中不同颜色曲线表示不同卫星, 由于不需要特定标出卫星号, 因此未给出图例。

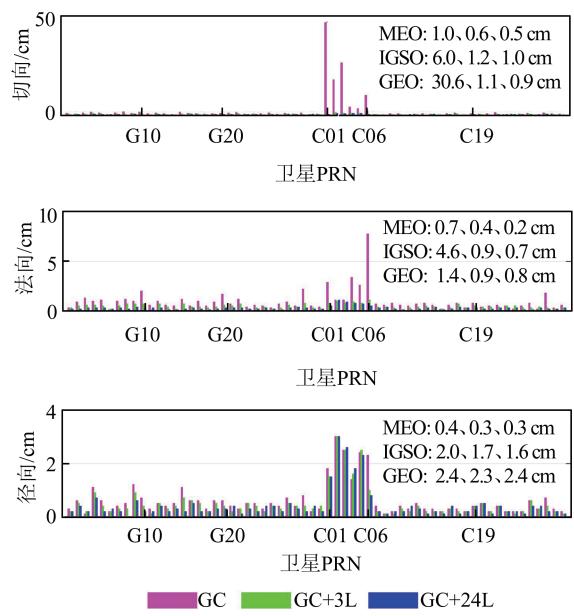


图 6 联合定轨每颗卫星定轨结果

Fig.6 Results of Combined Orbit Determination of Each Satellite

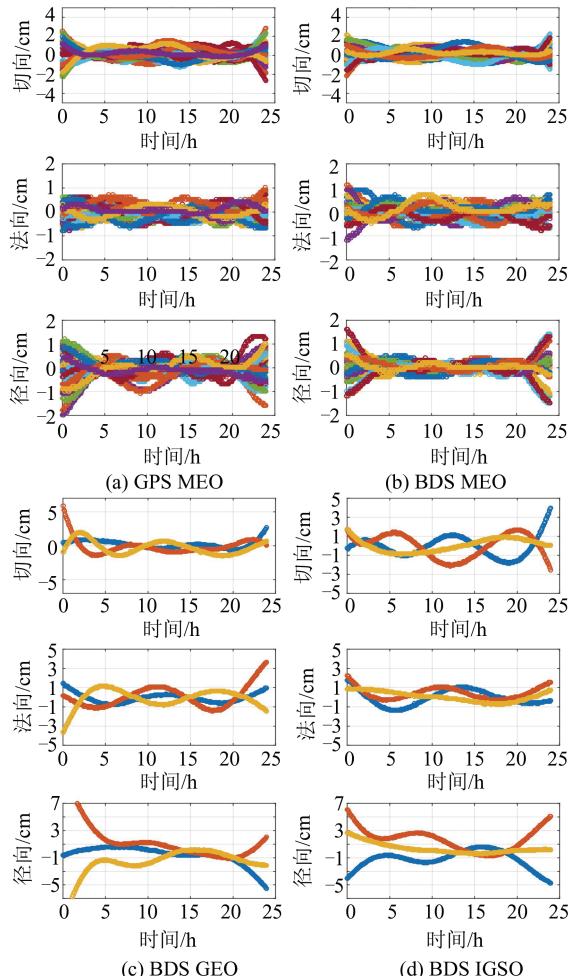


图 7 轨道历元比较结果

Fig.7 Comparison Results of Orbit Epochs

1) 仅 80 个地面测站定轨时, GEO 卫星在切向、法向、径向上的精度分别为 30.6 cm、1.7 cm、

2.4 cm,加入3颗LEO后,分别为1.1 cm、0.9 cm、2.3 cm,加入24颗LEO后,分别为0.9 cm、0.8 cm、2.4 cm,表明LEO对GEO卫星定轨精度提升显著,尤其在切向上表现更显著。

2)对于IGSO卫星,加入0颗、3颗、24颗LEO卫星后,切向精度分别为6 cm、1.2 cm、1 cm,法向分别为4.6 cm、0.9 cm、0.7 cm,径向分别为2 cm、1.7 cm、1.6 cm;MEO卫星切向精度分别为1 cm、0.6 cm、0.5 cm,法向分别为0.7 cm、0.4 cm、0.2 cm,径向分别为0.4 cm、0.3 cm、0.3 cm。表明加入3颗LEO后,各方向有毫米至厘米量级精度的提升,加入3颗与24颗LEO卫星时,IGSO和MEO卫星轨道精度基本相当。

3)由轨道历元比较结果可知,定轨结果服从零均值分布,反映了仿真策略的正确性。GEO、IGSO定轨精度相当,GNSS和BDS MEO卫星定轨精度基本相当。

2.2.3 LEO个数比较

为进一步分析加入LEO个数对联合定轨精度的提升,均匀选取LEO卫星,通过考虑加入3颗、6颗、12颗、24颗LEO星载GNSS观测数据时,分析在全球测站(50个)、亚海测站(25个)、区域测站(20个)情况下对双系统定轨精度的提升。所有方案整体定轨精度情况如图8所示。

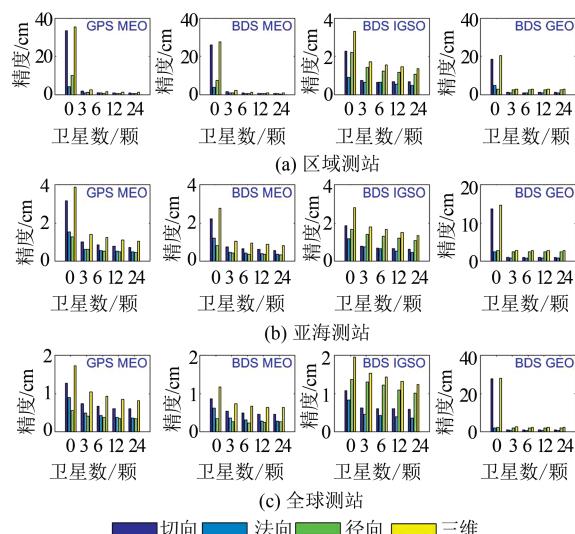


图8 不同LEO卫星数及地面测站联合定轨结果

Fig.8 Results of Combined Orbit Determination with Different Numbers of LEO and Ground Stations

为更细致地比较每个弧段的结果,绘制了2019年在亚海测站布局情况下每个弧段的定轨结果,如图9所示,其中OL、3L、6L、12L、24L分别表示精密定轨加0颗、3颗、6颗、12颗、24颗LEO

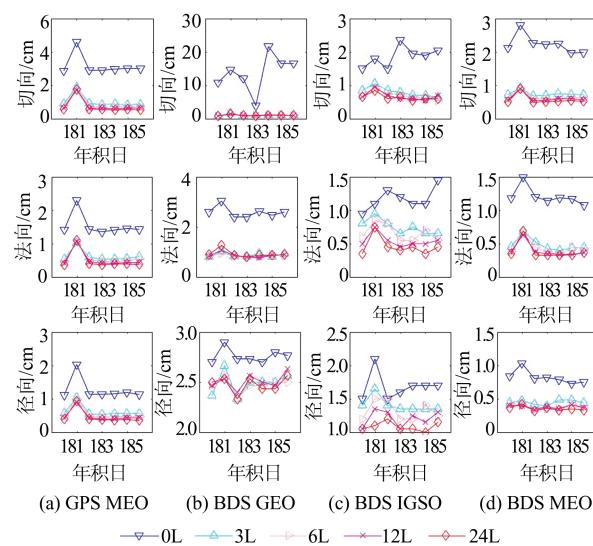


图9 亚海测站布局加入不同LEO个数各弧段定轨结果
Fig.9 Results of Asia-Overseas Stations Distribution with Different Numbers of LEO at Each POD Arc

的定轨策略。

1)在全球均匀分布50个测站下,当分别采用3颗、6颗、12颗、24颗LEO卫星与GNSS联合定轨时,导航卫星定轨精度整体上提升在毫米量级,加入0颗、3颗、24颗LEO之后,MEO卫星定轨精度三维RMSE分别为1.5 cm、0.9 cm、0.7 cm,IGSO卫星的定轨精度分别为2 cm、1.5 cm、1.2 cm,GEO卫星定轨精度分别为28.1 cm、2.5 cm、2.5 cm。相比仅地面测站定轨,加入LEO后,联合定轨方案的GEO卫星定轨精度的提高幅度明显大于IGSO和MEO卫星。与3颗LEO方案相比,24颗LEO方案的MEO、IGSO、GEO卫星定轨精度提高在几个毫米量级,改善幅度有限。

2)在亚海25个地面测站下,与仅利用地面测站数据相比,加入3颗LEO对导航卫星改善幅度在50%以上,其中,GEO三维精度由14.7 cm提升至2.9 cm,精度改善最为显著。加入3颗、6颗、12颗、24颗LEO,导航卫星的三维RMSE提升在毫米量级。

3)在亚太区域20个地面测站下,有/无LEO之间导航卫星定轨精度差异显著,在加入3颗LEO后,MEO卫星由31.6 cm提升至2.3 cm,IGSO卫星由3.3 cm提升至1.7 cm,GEO卫星由20.4 cm提升至2.8 cm。分别采用3颗、6颗、12颗、24颗LEO时,导航卫星定轨精度三维RMSE提升在毫米至厘米量级。

3 结 语

针对北斗系统监测站区域分布的问题,本文使用由 24 颗卫星组成的 LEO 星座,验证了小型化的 LEO 星座足够增强北斗卫星精密定轨。相比巨型的通信星座,可行性更强,更具有现实意义。

1) 仅地面测站定轨时,即使全球均匀分布且地面测站数量充足的情况下,GEO 卫星的定轨精度仍然受限,仅在分米量级;加入 LEO 星载 GNSS 观测数据后,精度提升至数个厘米量级,区域测站下加入 24 颗 LEO 时,GEO 卫星能够实现约 2 cm 的定轨精度。

2) 区域监测网下,仅地面测站定轨时,导航卫星定轨精度在分米至米级,加入 3 颗 LEO 后,MEO、IGSO、GEO 卫星三维 RMSE 精度提升至 3 cm 左右,提升效果较为显著。全球均匀/亚海测站布局时,加入 LEO 卫星后,导航卫星定轨精度仍有提升,对 MEO 及 IGSO 卫星提升幅度在毫米至厘米量级。

3) 在全球均匀、亚海、区域测站布局情况下,加入不同个数(相差 3 颗)导航卫星,三维轨道精度提升在数个毫米量级。相比加入 3 颗 LEO 卫星,加入 24 颗方案的提升差异约 1 cm。表明加入更多的 LEO 卫星对导航卫星定轨精度的提高较为有限。

以上结论仅基于仿真实验,部分结果可能较为理想。实际的改善幅度尤其是 LEO 卫星个数的增多对定轨精度的贡献,仍需要实测数据核校。

参 考 文 献

- [1] Du Lan. A Study on the Precise Orbit Determination of Geostationary Satellites[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2006 (杜 兰 . GEO 卫星精密定轨技术研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2006)
- [2] Zhu S, Reigber C, König R. Integrated Adjustment of CHAMP, GRACE, and GPS Data[J]. *Journal of Geodesy*, 2004, 78(1/2): 103-108
- [3] Geng Jianghui, Shi Chuang, Zhao Qile, et al. GPS Precision Orbit Determination from Combined Ground and Space-Borne Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(10): 906-909 (耿江辉, 施闯, 赵齐乐, 等. 联合地面和星载数据精密确定 GPS 卫星轨道[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(10): 906-909)
- [4] Zoulida M, Pollet A, Coulot D, et al. Multi-Technique Combination of Space Geodesy Observations: Impact of the Jason-2 Satellite on the GPS Satellite Orbits Estimation [J]. *Advances in Space Research*, 2016, 58(7): 1376-1389
- [5] König R, Reigber C, Zhu S Y. Dynamic Model Orbits and Earth System Parameters from Combined GPS and LEO Data [J]. *Advances in Space Research*, 2005, 36(3): 431-437
- [6] Kuang D, Bar-Sever Y, Haines B. Analysis of Orbital Configurations for Geocenter Determination with GPS and Low-Earth Orbiters [J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(5): 471-481
- [7] Zeng T, Sui L F, Jia X L, et al. Validation of Enhanced Orbit Determination for GPS Satellites with LEO GPS Data Considering Multi Ground Station Networks [J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(9): 2938-2951
- [8] Zhao Q L, Wang C, Guo J, et al. Enhanced Orbit Determination for BeiDou Satellites with Fengyun-3C Onboard GNSS Data [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(3): 1179-1190
- [9] Zeng Tian, Sui Lifen, Jia Xiaolin, et al. Results and Analysis of BDS Precise Orbit Determination with the Enhancement of Fengyun-3C[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46 (7) : 824-833 (曾添, 隋立芬, 贾小林, 等. 风云 3C 增强北斗定轨试验结果与分析[J]. 测绘学报, 2017, 46 (7): 824-833)
- [10] Li X X, Zhang K K, Zhang Q, et al. Integrated Orbit Determination of Fengyun-3C, BDS, and GPS Satellites[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(9): 8143-8160
- [11] 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
- [12] 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

Simulation of Combined Orbit Determination with a Small LEO Constellation and BDS-3 Full Constellation

ZENG Tian^{1,2,3} SUI Lifen¹ JIA Xiaolin² XIAO Guorui¹ DAI Qing¹ GAN Yu⁴

1 Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

2 State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054, China

3 Troops 93216, Beijing 100085, China

4 Hunan BDS Micro Chipset Industrial Development Co., Ltd, Changsha 410000, China

Abstract: Objectives: Limited by the regional distribution of ground monitoring stations and the geostatic characteristics of geostationary earth orbit (GEO) satellites, the GEO satellites of the BeiDou satellite navigation system (BDS) have poor orbit determination accuracy. The inclusion of spaceborne observation data of low-Earth orbit (LEO) satellites by processing combined precise orbit determination (CPOD) can improve the orbit determination accuracy of global navigation satellite systems (GNSS). Methods: This study simulates and analyzes the performance of CPOD with the BDS-3 full constellation and LEO satellites in enhancing the orbit determination accuracies of BDS satellites on the basis of a small LEO satellite constellation of 24 LEOs. With the simulated observation data, experiments of POD with ground stations only and CPOD with ground stations and LEOs are conducted. Three types of station networks, i.e. the global network, the Asia-Pacific regional network, and the Asia-Sea network, are discussed. Results: (1) The three dimension orbit accuracies of GEO satellites are at the decimeter magnitude in the case of POD with ground stations only. When LEO data are added, the corresponding orbit determination accuracy is at the centimeter level, with an increase of over 80%. (2) In the case of the regional station network, the three dimension root mean squares error(RMSE) of navigation satellite orbits are at the decimeter level. When LEO data are added, the orbit determination accuracies of all types of navigation satellites are several centimeters. (3) In the case of the global station network, the orbit determination accuracy of inclined Geo-Synchronous orbit (IGSO) and medium Earth orbit (MEO) satellites can still be improved on an millimeter-centimeter level. Conclusions: Under the regional monitoring network, the addition of a small number of LEO satellites can significantly improve the orbit accuracy of GNSS satellites. When the global uniform/Asia-Sea network is deployed, the orbit accuracy of navigation satellites can still be slightly improved after the addition of LEO satellites. With the more LEO satellites added, the improvement of the orbit determination accuracy of navigation satellites is limited.

Key words: BeiDou-3 global navigation satellite system (BDS-3); low-earth orbit(LEO) satellite; regional station network; combined orbit determination; constellation simulation

First author: ZENG Tian, PhD, engineer, specializes in GNSS POD and precise positioning. E-mail: tattian@126.com

Foundation support: The State Key Laboratory of Geo-Information Engineering (SKLGIE2018-M-2-1); the National Natural Science Foundation of China (41674016, 41874041, 41904039).

引文格式: 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. DOI:10.13203/j.whugis20190426 (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. DOI:10.13203/j.whugis20190426)