低轨星座导航增强能力研究与仿真

高为广¹, 张弓^{2*}, 刘成¹, 卢鋈¹, 王威¹, 陈颖¹, 李敏³, 吕飞仁⁴

1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;
2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;
3. 武汉大学卫星导航定位技术研究中心机构, 武汉 430079;
4. 中国西南电子设备研究所, 成都 610036

*联系人, E-mail: barry19850906@163.com

收稿日期: 2020-06-29; 接受日期: 2020-09-09; 网络出版日期: 2020-12-15

国家自然科学基金(编号: 41974041)和中国科协青年人才托举工程(编号: 2019QNRC001)资助项目

摘要 低轨卫星星座具有几何图形变化快、落地信号功率强、全球天基监测覆盖等天然优势, 可对中高轨全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)星座进行有效补充和增强, 提升全球定位、导航与授时(Positioning, Navigation and Timing, PNT)服务的精度、完好性、可用性和抗干扰能力, 已成为下一代卫星导航系统重要的发展方向. 本文总结了国内外低轨星座发展现状, 对不同低轨星座进行了分析和设计, 对低轨星座提升导航定位精度、加速精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)收敛、全球天基监测等导航增强能力进行了分析, 重点论证了低轨星座突破现有中高轨GNSS技术瓶颈的机遇和体系增量能力, 给出了相应的仿真分析结果, 以期对我国低轨星座和北斗卫星导航系统的融合发展提供参考和建议.

关键词 低轨星座, 导航增强, 精密单点定位, 天基监测, 仿真

PACS: 91.10.Fc, 84.40.Ua, 95.10.Eg

1 引言

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite Systems, GNSS)可向全球用户提供高质量的定位、导航和授时服务, 在各个领域发挥着巨大作用^[1]. 近年来, 卫星导航应用不断拓展, 高性能服务正逐渐成为卫星导航系统的标配. 由此, 精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)、实时动态载波相位差分(Real-Time Kinematic, RTK)、星基增强系统(Satellite-Based Aug-

mentation System, SBAS)、地基增强系统(Ground-Based Augmentation System, GBAS)^[2]等各类导航增强系统和技术快速发展. 然而, 这些现行的技术与系统存在着“碎片”和“补丁”式建设问题^[3], 均无法满足全球广大用户对高性能导航服务的需求. 低轨卫星星座运动速度快、成本低, 利用其作为天基平台进行导航增强和各类监视, 可不依赖密集地面建站完成全球覆盖, 实现高精度服务的准实时收敛, 有望解决当前高性能导航服务的瓶颈, 成为下一代卫星导航系统的重要发

引用格式: 高为广, 张弓, 刘成, 等. 低轨星座导航增强能力研究与仿真. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 019506

Gao W G, Zhang G, Liu C, et al. Research and simulation of LEO-based navigation augmentation (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 019506, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0223](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0223)

展方向^[4].

当前, 国外低轨星座蓬勃发展, 低轨导航增强和通导融合研究、试验和应用也成为热点, 表1列出了国内外部分低轨星座. 美国铱星、Globalstar^[5]和SpaceX^[6]等星座计划受到全球瞩目, 其中铱星(Iridium)和下一代铱星(Iridium NEXT)在通信业务以外, 可提供STL (Satellites Time and Location)服务, 实现室内和峡谷地区的定位导航和授时^[7]. 欧洲专家提出建立开普勒低轨系统, 在减少地面运控测量通信设施的同时, 可大幅增强Galileo系统的完好性和定轨精度; 国内“鸿雁”“虹云”和“微厘空间”等也开展了低轨增强研究和技术试验^[8]. LEO增强能力研究的相关文献中, 文献[9]对导航增强的LEO卫星星座的设计方法进行了研究, 论证了轨道高度和倾角对低轨星座构型的影响, 仿真分析了LEO卫星对GNSS全球精度因子的改善; 文献[10]提出了一种实用LEO卫星定轨算法, 可实现LEO卫星的高精度定轨; 文献[11]从通导融合的角度, 对低轨通信卫星的导航增强能力进行了分析与仿真, 并运用遗传算法, 提高了高精度定位的收敛速度; 文献[12]对LEO卫星在高中低地联合精密定轨技术进行了研究, 从坐标和时间系统、卫星轨道方程及其几何观测模型和参数估计等方面分析了高中低地联合精密定轨的关键技术; 文献[13,14]对PPP技术展开了研究, 按照一定构型部署LEO卫星后, PPP的收敛时间可缩短到1 min以内; 文献[15]分析了基于铱星增强的GPS系统

RAIM性能, 分析和仿真结果表明铱星显著提高了GPS故障检测和识别的概率.

本文基于低轨星座几何变化快、全球天基覆盖、适合各类搭载配置等技术特点, 聚焦低轨导航增强性能, 对常用的全球低轨星座进行了分析, 并提出了组合星座设计方案, 给出了增加低轨卫星后北斗系统能力和服务性能提升的仿真结果, 可为通导融合和低轨导航增强后续发展提供参考借鉴.

2 基于北斗的低轨导航增强系统

基于北斗的低轨导航增强系统包括空间段、地面段和用户段三大部分. 系统组成如图1所示.

(1) 空间段

空间段由高、中、低轨混合星座构成. 其中高中轨为北斗全球系统标准设计星座, 即3颗GEO、3颗IGSO和24颗MEO卫星, LEO星座提供全球多重覆盖, 并设计高速星间链路和星地链路, 实现全球导航信息和信号增强.

(2) 地面段

地面段包括1个主控站、2个信关站和若干监测站. 监测站观测低轨和GNSS信号, 并将观测结果和测量数据送往主控站. 主控站实时完成数据综合和处理, 生成低轨注入电文、GNSS精密轨道改正数、钟差改正数等各类增强信息产品. 信关站将增强信息产品定时注

表 1 国内外部分低轨星座

Table 1 Some domestic and international LEO constellations

星座	卫星数	轨道	业务	国家及地区
Iridium	66	近极轨道, 86.4°	语音+STL	美国
Iridium Next	75	近极轨道, 86.4°	宽带+STL	美国
Globalstar	48	倾斜轨道, 52°	语音	美国
SpaceX Starlink	42000	混合轨道, 74°/81°/70°/45°	宽带	美国
Boeing	1767	混合轨道, 55°/88°	宽带	美国
Kepler	24	倾斜轨道, 56°	导航增强	欧洲
Astrocast	64	—	物联网	瑞士
Astrome	150	—	宽带	印度
Samsung	4600	—	宽带	韩国
“鸿雁”星座	300	—	宽带+导航增强	中国
“虹云”星座	156	—	宽带+导航增强	中国
微厘空间	150	混合轨道	宽带+导航增强	中国

图 1 (网络版彩图)基于北斗的低轨导航增强系统

Figure 1 (Color online) BDS navigation augmentation system based on LEO constellation.

入, 通过星间链路实现低轨星座数据分发和运行维护.

(3) 用户段

用户终端接收北斗高、中轨星座播发的导航信号以及低轨星座播发的导航增强信号. 利用中高轨导航信号进行距离或速度测量, 利用低轨星座播发导航增强信号实现PPP信号信息增强、完好性增强等. 低轨导航增强信号与GNSS系统兼容互操作, 可在现有用户终端硬件架构下通过修改软件对其进行处理, 获得高性能导航服务, 并实现低成本.

3 星座分析和方案设计

3.1 几何强度和收敛时间

PPP基于卫星载波相位测量, 而载波相位测量模糊度解算时间和卫星几何图形变化密切相关. PPP收敛时间的经验公式^[16]如下:

$$\text{Convergence time} = f(\dot{s}, \text{PDOP}) = k \frac{\dot{s}}{\text{PDOP}},$$

其中系数 k 与信号频率、大气状态、数据观测质量和

模型精度等相关; $\dot{s}$ 为卫星和地面用户的距离变化率; PDOP为空间位置精度因子. 中高轨GNSS卫星运行速度较慢, 短时间内空间几何变化不明显, PPP收敛一般需要20–40 min; LEO卫星运行速度非常快, 空间几何结构变化较大, 从而使得模糊度参数和位置坐标易于分离, 利用其播发的信号可实现分钟级的PPP快速收敛. 图2对比了北斗中轨卫星与LEO卫星相同时间划过的轨迹, LEO卫星120 s时间划过的轨迹和北斗中轨卫星1800 s划过的轨迹长度相当.

基于不同轨道高度卫星的数学仿真, 模糊度收敛所需的时间与卫星类型的关系如表2所示^[16].

3.2 星座设计

我们设计了两种常见的低轨星座, 即倾角为55°的倾斜轨道星座(Walker1)和倾角为89°的极轨星座(Walker2), 兼顾高精度增强性能和建设成本, 本文初始设计的星座卫星数量为120颗, 均匀分布在12个轨道面. 考察两种低轨星座对北斗全球系统标准设计星座的增强性能.

图 2 (网络版彩图)中轨卫星与LEO卫星几何图形对比
Figure 2 (Color online) Comparison of geometric figures for MEO satellites and LEO satellites.

表 2 收敛时间与卫星轨道高度和类型的关系

Table 2 The relationship between convergence time and satellite orbit and type

轨道高度与类型	模糊度收敛所需时间
低轨卫星(1000 km)	1 min
10000 km轨道高度卫星	7 min
MEO (20000 km)	20 min
IGSO (36000 km)	2 h
GEO (36000 km)	+∞

3.2.1 覆盖性比较

比较分析两种常见低轨星座的覆盖性能, 在全球范围内计算星座的可见卫星数, 卫星截止高度角 10° . 仿真分析结果如图3和4所示. Walker1星座在南北纬 30° – 60° 范围可见卫星数最多, 可达5–6颗, 在南北纬 0° – 30° 可见卫星2–4颗, 最高覆盖纬度可达南北纬 76° . Walker2星座主要覆盖区域为两极地区, 在赤道地区仅能2重覆盖.

综合分析可知, Walker1星座在中高纬度全球经济发达地区和人口稠密地区有良好的覆盖性. Walker2极轨星座则在两极人口稀疏地区覆盖性好.

3.2.2 增强性能比较

比较分析两种常见低轨星座的高精度增强性能, 选择 0° N– 80° N共9个地面站(EN00, EN10, EN20,

图 3 (网络版彩图)星座可见卫星数目. (a) Walk1; (b) Walk2
Figure 3 (Color online) Number of visible satellites for Constellations. (a) Walk1; (b) Walk2.

EN30, EN40, EN50, EN60, EN70, EN80), 卫星截止高度角 10° . 采用仿真数据进行精密单点定位解算处理, 仿真数据时长1 h. 图5分别给出三个典型地理位置, 即纬度 0° 、纬度 40° 、纬度 80° , 在Walker1, Walker2星座增强下的定位误差曲线前300 s的仿真结果, 图中黑线为10 cm误差线.

由仿真结果可知, 在纬度 60° 以下地区, 倾斜轨道

图 4 (网络版彩图) 可视卫星数目在不同纬度地区的平均值
Figure 4 (Color online) The average number of visible satellites at different latitudes.

星座 PPP 收敛速度远大于极轨轨道星座, 尤其是在东西方向, 这是由于 Walker1 倾斜轨道星座在纬度 60° 以下地区良好的卫星可见性和卫星在东西方向运动速度较快. 在纬度 60° 以上地区, 由于 Walker2 极轨星座覆盖性能优于 Walker1 倾斜轨道星座, 极轨星座 PPP 收敛速度优于倾斜轨道星座.

3.3 组合星座方案

综合比较两种低轨星座, 考虑辐射环境、轨位和频率、星座整体构型维持、发射成本、系统效费比等, 为实现全球低轨导航增强以及全球良好的 PPP 收敛性能, 最终选取 55° 和 85° 倾角组成的双 Walker 组合星座方案.

组合星座方案共包括 150 颗卫星. 55° 倾角 Walker 星座采用 120/12/0 构型, 轨道高度 975 km; 极轨星座采用 30/3/0 构型, 轨道倾角 85° , 轨道高度 1248 km. 两个 Walker 星座进动速度一致, 星座长期整体构型稳定. LEO 星座覆盖性能如图 6 所示. 55° Walker 星座最高覆盖纬度可达南北纬 76° , 在南北纬 30° – 60° 范围内覆盖卫星数最多, 可保证在中高纬度和低纬度全球经济发达和人口稠密地区相对均匀的卫星覆盖, 满足高精度收敛速度和定位精度; 85° 倾角的极轨星座实现高纬度和两极地区的覆盖和服务, 30 颗卫星可保证两极地区的可见卫星数和几何构型, 满足服务性能要求.

4 增强能力分析和仿真

低轨星座加入后, 与北斗系统组成高、中、低轨混合星座, 可进一步提升北斗系统 PDOP 和导航定位

精度, 实现全球近实时高精度增强; 此外, 利用低轨卫星的轨道特性和全球分布, 在低轨卫星配置星载高精度 GNSS 接收机, 可作为全球天基监测站, 在区域布站条件下增强北斗系统轨道和钟差精度, 实现全球完好性监测和报警, 全面提升北斗系统的服务性能.

4.1 PDOP 和导航定位精度

卫星导航定位精度由用户等效测距误差 (UERE) 和定位精度因子 (PDOP) 决定, 同时星座 PDOP 也是 PPP 收敛时间的重要影响因素. 以北斗全球系统标准设计星座为背景, 对 150 颗低轨卫星加入前后的全球 PDOP 值分布特征进行了计算仿真, 结果见表 3. 图 7 给出了低轨卫星加入前后 PDOP 分布的仿真结果, 低轨卫星加入后, 改善了星座几何构型, 平均 PDOP 值由 1.99 降低到 1.48, 提升 25.6%.

4.2 全球近实时高精度增强

对高中低混合星座的 PPP 收敛性能进行仿真, 观测仿真建模考虑 BDS 轨道钟差、低轨卫星轨道钟差、电离层误差、对流层误差、接收机钟差、相对论效应、相位缠绕误差、测站位移、相位噪声、伪距噪声等, 其中北斗系统和低轨卫星轨道加入了实际定轨误差. 为了仿真对流层对定位影响, 解算时特意采用了 GMF 映射函数以与仿真模型作区分.

根据我国国际 GNSS 监测评估系统评估结果, 北斗卫星实时轨道和钟差精度约 5 cm, 空间信号精度 SISRE 约 3 cm. 表 4 给出了加入低轨星座后 PPP 收敛时间的仿真结果. 在 150 颗低轨卫星的支持下, 北斗 + LEO 全球 PPP 服务性能平面 5 cm, 高程 10 cm, 收敛时间约 1 min. 以 CMUM 为例, 加入低轨前 PPP 收敛时间为 483 s, 收敛速度提升 20 倍以上.

4.3 天基监测

4.3.1 空间信号精度提升

北斗中高轨卫星和低轨卫星联合解算可实现轨道和钟差精度的大幅提升. 联合定轨可采取基于 GNSS 地面站和低轨卫星星载 GNSS 数据的“一步法”求解, 联合定轨模型如下.

由卫星精密定轨问题的一般性描述可知^[17], 对导航卫星和低轨卫星的运动方程和变分方程积分, 就可以分别得到它们的初始参考轨道和状态转移矩

图 5 (网络版彩图)典型纬度地区ENU三个方向的3D定位误差. (a) 纬度0°; (b) 纬度40°; (c) 纬度80°

Figure 5 (Color online) Three directions of ENU and 3D positioning error at different latitudes. (a) Latitude 0°; (b) latitude 40°; (c) latitude 80°.

图 6 (网络版彩图) LEO星座覆盖性能

Figure 6 (Color online) LEO constellation coverage performance.

表 3 低轨星座加入前后PDOP值

Table 3 BDS and LEO/BDS PDOP

星座	卫星	PDOP 最大值	PDOP 最小值	PDOP 平均值
BDS	3GEO +3IGSO +24MEO	2.39	1.13	1.99
BDS+LEO	BDS +150LEO	1.93	1.10	1.48

图 7 (网络版彩图)北斗和北斗+低轨星座全球PDOP分布。(a) 北斗; (b) 北斗+低轨

Figure 7 (Color online) Global distribution of PDOP for BDS and BDS/LEO. (a) BDS; (b) BDS+LEO.

阵 $\Phi_{BD}(t_i, t_0)$, $\Phi_{LEO}(t_i, t_0)$, 其中状态转移矩阵应满足方程

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{BDi}^* = \Phi_{BD}(t_i, t_0) \mathbf{X}_{BD0}^*, \\ \mathbf{X}_{LEOi}^* = \Phi_{LEO}(t_i, t_0) \mathbf{X}_{LEO0}^*, \end{cases}$$

式中, $\mathbf{X}_{BDi}^*$ 和 $\mathbf{X}_{LEOi}^*$ 分别表示导航卫星和低轨卫星在时刻 t_i 的状态改正数向量, $\mathbf{X}_{BD0}^*$ 和 $\mathbf{X}_{LEO0}^*$ 分别表示它们在初始时刻 t_0 (参考历元) 的状态改正数向量. 上式用于将卫星在其他时刻的状态改正数映射到初始时刻. 设地面和星载北斗接收机的观测方程分别为

$$Y_{GROUNDi} = F_{GB}(\mathbf{X}_{BDi}, \mathbf{X}_{oi}, t_i) + \zeta_{BDi},$$

$$Y_{LEOi} = F_{LB}(\mathbf{X}_{BDi}, \mathbf{X}_{LEOi}, \mathbf{X}_{oi}, t_i) + \zeta_{LEOi},$$

式中, $Y_{GROUNDi}$ 和 Y_{LEOi} 分别表示地面和星载接收机在 t_i 时刻的观测值; F_{GB} 和 F_{LB} 分别表示地面和星载接收机在 t_i 时刻的观测函数; $\mathbf{X}_{oi}$ 和 $\mathbf{X}_{oi}$ 分别表示除了 $\mathbf{X}_{BDi}$ 和 $\mathbf{X}_{LEOi}$ 之外的其他待估参数, 如钟差、模糊度、大气参数等; $\zeta_{GROUNDi}$ 和 ζ_{LEOi} 是相应观测值的观测误差. 对非线性观测方程进行线性化, 则得

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{GROUNDi} = \frac{\partial F_{GB}}{\partial \mathbf{X}_{BDi}} \Phi_{BD}(t_i, t_0) \mathbf{X}_{BD0}^* \\ + \frac{\partial F_{GB}}{\partial \mathbf{X}_{oi}} \mathbf{X}_{oi}^* - \mathbf{I}_{GROUNDi}, \\ \mathbf{V}_{LEOi} = \frac{\partial F_{LB}}{\partial \mathbf{X}_{BDi}} \Phi_{BD}(t_i, t_0) \mathbf{X}_{BD0}^* \\ + \frac{\partial F_{LB}}{\partial \mathbf{X}_{LEOi}} \Phi_{LEO}(t_i, t_0) \mathbf{X}_{LEO0}^* + \frac{\partial F_{LB}}{\partial \mathbf{X}_{oi}} \mathbf{X}_{oi}^* - \mathbf{I}_{LEOi}. \end{cases}$$

上式即为导航卫星和低轨卫星联合定轨观测方程, 然后结合参数最优估计方法以完成联合解算. 图8给出了低轨卫星加入前后, 区域站条件下北斗卫星轨道URE和空间信号精度的仿真结果比较. 对于MEO卫星、GEO/IGSO卫星空间信号精度计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{SISRE}_{\text{MEO}} &= \sqrt{(0.99\Delta R - C\text{clk})^2 + (0.14\Delta T)^2 + (0.14\Delta N)^2}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SISRE}_{\text{IGSO/GEO}} &= \sqrt{(\Delta R - C\text{clk})^2 + (0.09\Delta T)^2 + (0.09\Delta N)^2}. \end{aligned}$$

仿真结果表明, 加入12颗LEO卫星天基监测数据后, 利用中高轨卫星和低轨卫星联合解算, 区域布站条件下, 北斗卫星轨道精度由0.216 m提升到0.070 m,

表 4 加入低轨星座后PPP收敛时间

Table 4 PPP convergence time with LEO constellation

地面站点	BDS+LEO (10 cm收敛)				BDS+LEO (5 cm收敛)			
	E (mm)	N (mm)	U (mm)	time (s)	E (mm)	N (mm)	U (mm)	time (s)
CMUM	9.9	9.9	10	23	9.1	8.9	9.6	65
DJIG	13.1	6.7	13.4	45	10.3	5.7	12.1	107
EUSM	13	7.1	17.7	39	6.9	7.4	11.5	715
HKSL	9.2	6.3	13.2	24	7.7	4.8	11.1	143
HLAR	5.3	6.7	11.5	43	5.3	6.5	9.1	75
KOUR	10	7.4	23.3	32	6.3	7.8	16.2	484
KZN2	9	9.2	13.7	26	9	8.7	13.6	34
LHAZ	7.2	12.2	17.3	51	5.7	11.7	16.5	78
MAL2	7.6	4.7	31.9	76	9.6	3.7	25.1	2055
MOBS	8	4.6	10.6	19	7.8	4.5	9.9	33
RGDG	7.6	16.3	11.5	29	7.5	16.3	11.4	32
UCAL	3.8	12.3	16.9	19	3.5	12.1	16.1	38
USN8	12.7	6.9	12.5	17	12.7	5.6	11.7	304
WUHN	11.6	6.1	12	22	11.4	6	11.7	46

图 8 (网络版彩图)区域站+低轨条件下URE仿真结果
Figure 8 (Color online) URE simulation result with regional station and LEO.

图 9 (网络版彩图) BDS完好性监测覆盖性仿真

Figure 9 (Color online) Simulation for BDS integrity monitoring coverage.

空间信号精度由0.597 m提升到0.112 m.

4.3.2 全球完好性监测

为实现完好性监测和多重表决, 提升全球完好性, 低轨星座对中高轨GNSS卫星至少应三重或以上覆盖. 经过仿真分析, 在55° Walker星座中选取24颗卫星(即LEO每个轨道面两颗卫星, 相位差为180°, 相邻轨道监测卫星相位角相差36°)可对中高轨GNSS卫星形成较好覆盖性能, 满足全天时3重以上覆盖的要求. 24颗卫星对北斗星座的覆盖情况如图9所示. 仿真结果表明, 24颗LEO卫星可实现北斗星座至少4重覆盖, MEO卫星平均覆盖重数为6.7, 满足要求. 如所有低轨卫星均进行监测, 对北斗中高轨卫星的平均覆盖重数可达41.

4.3.3 全球电离层监测

在低轨卫星上搭载多模掩星接收机, 可接收北斗、GPS、GLONASS、Galileo导航信号. 利用低轨卫星对四大全球系统进行2 h掩星事件监测和计算, 一共获得19877次掩星事件, 其中北斗6572次、GPS 4953次、GLONASS 4223次、Galileo 4129次. 电离层掩星事件的掩星点全球分布如图10所示. 在双Walker组合星座设计下, 掩星星下点的分布在全球基本均匀, 在

图 10 (网络版彩图)低轨星座GNSS掩星观测全球分布图

Figure 10 (Color online) Global distribution map of GNSS Occultation exploration with LEO.

陆地、海洋和极区都能获得足够的掩星观测数据, 良好的数据分布能保证全球电离层格网参数解算, 对于播发全球电离层参数、提升北斗系统全球服务性能具有重要意义.

5 结论

北斗系统已开通服务, 向全球用户提供更加优质、更加完善的时空信息服务. 通过分析, LEO星座

的加入可提升和增强北斗系统性能, 改善星座的几何构型、提高导航定位精度, 实现高精度近实时收敛、全球天基监测、全球完好性报警等. 仿真结果表明, 150颗 LEO卫星组成的低轨星座加入后, 星座平均PDOP值和定位精度提升25.6%; PPP收敛时间提升20倍左右, 实现

1 min内分米级高精度; 利用低轨卫星作为天基监测可在区域布站条件下使北斗卫星空间信号精度大幅提升, 实现全球完好性监测告警, 获取掩星观测数据并处理成全球电离层格网参数. 本文的分析和仿真, 对北斗系统和LEO星座后续的规划和发展具有一定参考意义.

参考文献

- 1 Tan S S. Satellite Navigation and Positioning Engineering (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 2010 [谭述森. 卫星导航定位工程. 北京: 国防工业出版社, 2010]
- 2 Paziewski J, Wielgosz P. Investigation of some selected strategies for multi-GNSS instantaneous RTK positioning. *Adv Space Res*, 2017, 59: 12–23
- 3 Guo S R, Liu C, Gao W G, et al. Construction and development of satellite navigation augmentation systems (in Chinese). *GNSS World China*, 2019, 44: 1–12 [郭树人, 刘成, 高为广, 等. 卫星导航增强系统建设与发展. 全球定位系统, 2019, 44: 1–12]
- 4 Zhang X H, Ma F J. Review of the development of LEO navigation-augmented GNSS (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2019, 48: 1073–1087 [张小红, 马福建. 低轨导航增强GNSS发展综述. 测绘学报, 2019, 48: 1073–1087]
- 5 Dietrich F J, Metzen P, Monte P. The Globalstar cellular satellite system. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1998, 46: 935–942
- 6 Hang X Y. FCC approves projects for SpaceX, Telesat, Low Orbit and Kepler constellation (in Chinese). *Satellite Appl*, 2018, 12: 6 [航小宇. FCC批准SpaceX, Telesat, 低轨星和开普勒星座项目落地. 卫星应用, 2018, 12: 6]
- 7 Landry R J, Nguyen A Q, Rasae H, et al. Iridium next LEO satellites as an alternative PNT in GNSS denied environments-Part 1. *Inside GNSS*, 2019, 14: 56–65
- 8 Meng Y S, Bian L, Wang Y, et al. Global navigation augmentation system based on Hongyan satellite constellation (in Chinese). *Space Int*, 2018, 10: 20–27 [蒙艳松, 边朗, 王瑛, 等. 基于“鸿雁”星座的全球导航增强系统. 国际太空, 2018, 10: 20–27]
- 9 Tian Y, Zhang L X, Bian L. Design of LEO satellites augmented constellation for navigation (in Chinese). *Chin Space Sci Tech*, 2019, 39: 55–61 [田野, 张立新, 边朗. 低轨导航增强卫星星座设计. 中国空间科学技术, 2019, 39: 55–61]
- 10 Grejner-brzezinska D A, Shum C K, Kwon J H. A practical algorithm for LEO orbit determination. *Navigation*, 2002, 49: 127–135
- 11 Yang B. Research on Enhanced Navigation Technologies Based on Low Earth Orbit Satellite (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017 [杨波. 低轨卫星增强导航技术研究. 硕士学位论文. 成都: 电子科技大学, 2017]
- 12 Su X. Theory and Method Research for Global Real-Time Centi-meter Level Navigation System Based on High, Medium and Low Orbit Satellites (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Wuhan University, 2017 [苏醒. 基于高中低轨卫星的全球实时厘米级导航系统理论与方法研究. 博士学位论文. 武汉: 武汉大学, 2017]
- 13 Li X, Ma F, Li X, et al. LEO constellation-augmented multi-GNSS for rapid PPP convergence. *J Geod*, 2019, 93: 749–764
- 14 Ma F J. Research on the Key Technologies for GNSS Precise Positioning Augmented with LEO Constellation (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Wuhan: Wuhan University, 2018 [马福建. 低轨星座增强GNSS精密定位关键技术研究. 硕士学位论文. 武汉: 武汉大学, 2018]
- 15 Tian S W, Li G X, Chang J, et al. Receiver autonomous integrity monitoring in iridium-augmented GPS (in Chinese). *J PLA Univ Sci Tech (Nat Sci Ed)*, 2013, 14: 237–241 [田世伟, 李广侠, 常江, 等. 基于铱星增强的GPS系统RAIM性能. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2013, 14: 237–241]
- 16 Su H. Precise orbit determination of Global Navigation Satellite System of Second Generation (GNSS-2). Dissertation for Doctoral Degree. Neubiberg: University FAF Munich, 2000
- 17 Geng J H, Shi C, Zhao Q L, et al. GPS precision orbit determination from combined ground and space-borne data (in Chinese). *Geomat Inf Sci Wuhan Univ*, 2007, 32: 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. 武汉大学学报信息科学版, 2007, 32: 906–909]

Research and simulation of LEO-based navigation augmentation

GAO WeiGuang¹, ZHANG Gong^{2*}, LIU Cheng¹, LU Jun¹, WANG Wei¹, CHEN Ying¹,
LI Min³ & LV FeiRen⁴

¹ *Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China;*

² *Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;*

³ *GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China;*

⁴ *Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, China*

The low Earth orbit (LEO) constellation satellite has natural features such as rapid geometric changes, strong signal power, and global space-based monitoring coverage. It can effectively supplement and enhance the global navigation satellite system (GNSS) in the mid-high orbit. Moreover, it can improve the accuracy, integrity, availability, and anti-interference capabilities of the positioning, navigation, and timing service, which has become an important development direction for next-generation satellite navigation systems. This paper summarizes the development status of the LEO constellations, designs the LEO constellations, and analyzes the navigation augmentation capabilities of the LEO constellations, such as improving the positioning accuracy, accelerating precision point positioning convergence, and global space-based monitoring. It focuses on illustrating the possibilities for the low-orbit constellation to break through the bottleneck of the existing mid-orbit and high-orbit GNSS technology and shows chances of the system incremental capabilities. The corresponding simulation results are specified to provide references and suggestions for the integration of the development of China's low-orbit constellation and Beidou satellite navigation system.

LEO constellation, navigation augmentation, precise point positioning, space-based monitoring, simulation

PACS: 91.10.Fc, 84.40.Ua, 95.10.Eg

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0223](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0223)