



珞珈一号低轨卫星导航增强系统信号质量评估

王 磊^{1,2} 陈锐志^{1,2} 李德仁^{1,2} 蔚保国³ 伍蔡伦³

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

3 卫星导航系统与装备技术国家重点实验室,河北 石家庄,050200

摘要:低轨卫星导航信号增强能够弥补现有中高轨导航卫星信号收敛慢、信号弱的不足,在下一代导航定位技术中占有重要地位。武汉大学研制的珞珈一号科学实验卫星搭载了导航增强载荷,能够在轨自动计算轨道和钟差,并自主生成和播发双频测距信号,首次实现了低轨卫星平台的导航信号增强。就珞珈一号卫星导航增强信号的质量,包括信号载噪比、伪距和载波相位测量精度以及单星授时精度进行了评估,结果显示,珞珈一号卫星高仰角的伪距和载波相位测量精度分别优于1.5 m和1.7 mm,能够满足导航信号增强的需求。珞珈一号卫星单星授时的精度在10~30 ns量级,证明了珞珈一号卫星星地测距链路的正确性和有效性。

关键词:导航增强;低轨卫星导航;珞珈一号;导航信号增强;信号质量

中图分类号:P228

文献标志码:A

随着我国北斗系统的快速部署,全球导航系统进入了多GNSS(global navigation satellite system)的时代。目前4大全球卫星导航系统在轨运行的卫星总数已接近100颗,在可见卫星数、几何精度衰减因子等方面都有了显著的提高,但是仍然有一些问题是目前的星座难以解决的,包括长基线解算和精密单点定位收敛较慢,GNSS信号较弱,容易被干扰等问题。就导航系统存在的问题,如何构建下一代定位、导航、授时(positioning, navigation, and timing, PNT)系统,杨元喜院士描绘了综合PNT系统和弹性PNT框架^[1-2],其中天基导航增强信息源是下一代PNT系统的关键技术之一。李德仁院士提出发展通信、导航、遥感一体化天基实时服务系统的构想,解决我国天基信息系统覆盖能力有限、响应速度慢、协同能力弱等问题^[3]。低轨卫星导航增强服务也作为维持空间信息网络时空基准。

GNSS增强技术从增强原理的角度划分包括信息增强技术和信号增强技术两种。信息增强技术是指利用地面跟踪网数据解算GNSS信号的误差改正数和完好性信息,再通过地基互联网或者卫星通信信道播发给用户,用户利用接收到的GNSS的改正数修正本机接收的GNSS信号误

差,从而提高定位精度和完好性。该类系统包括广域完好性增强系统,如美国的WAAS(wide area augmentation system)、Trimble公司的RTX、合众思壮公司的中国精度、中海达公司的Hi-RTP系统以及千寻网络的北斗地基增强系统等。这些增强系统允许用户实现实时或准实时的分米至厘米级定位服务,但是对于GNSS定位不佳的应用场景,信息增强也无能为力。信号增强技术是指增强信号源能够发射测距信号,从而扩展和延伸GNSS的应用场景。通过信号增强技术,允许用户在无法使用GNSS定位或者GNSS定位效果不佳的场景获得准确可靠的位置信息。目前信号增强方面的研究主要集中在地基伪卫星技术,如澳大利亚的Locata系统^[4-5]、GPS Repeater系统^[6]。广义的信号增强技术还包括机会信号,如DVB-T信号^[7]、Wi-Fi信号^[8]、蓝牙信号^[9]、移动蜂窝信号^[10]等。地基增强信号覆盖范围有限,受视距限制,且信号沿地表传播导致多路径影响严重。

目前,采用低轨卫星平台进行导航信号增强的研究还处于仿真阶段^[11-13]。使用低轨卫星平台进行导航信号增强,除了增加卫星可见性,减小定位精度衰减因子外,还具有以下优势:①低轨卫

星平台运动快,有助于加快精密定位滤波收敛。仿真结果显示,低轨星座有望将精密单点定位的收敛时间从30 min缩短到1~2 min。②低轨卫星轨道高度低,信号自由空间损耗小。对于650 km高度的卫星,1.5 GHz的信号自由空间损耗比GPS信号小30 dB以上。信号损耗小意味着发射功率相同的信号,低轨卫星地面收到的信号更强,具有更好的抗干扰能力。③与地基信号增强相比,低轨卫星信号覆盖范围更大,对于650 km卫星,半波束角为60°的信号覆盖半径大于2 500 km。④低轨卫星平台能够实现全球范围的信号增强。

武汉大学研制的珞珈一号科学实验卫星同时具备夜光遥感和导航增强的功能,于2018年6月2日成功发射,并且首次成功开展了基于低轨卫星平台的导航信号增强实验,本文对珞珈一号卫星导航增强信号的质量和初步性能进行了评估。

1 珞珈一号导航增强系统工作原理

珞珈一号卫星总质量19.8 kg(不含分离装置),轨道高度为647 km。珞珈一号卫星导航增强系统的工作原理如图1所示。珞珈一号卫星在轨天接收北斗、GPS的双频信号进行实时自主精密定轨和授时,在轨自主生成双频测距信号向地面播发。地面用户可同时接收双频北斗、GPS信号和珞珈一号双频导航增强信号来实现高/中/低轨混合卫星星座定位,从而提高其导航定位的性能。受到卫星平台的限制,导航增强任务与遥感任务分时工作。由于低轨卫星运动较快,珞珈一号单次过境时间大约在10 min。

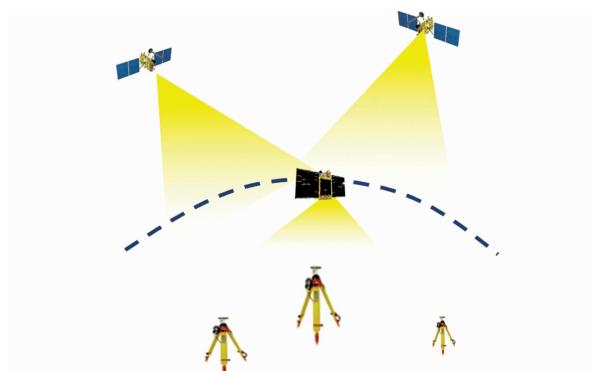


图1 珞珈一号导航增强工作原理示意

Fig. 1 Demonstration of Principle of the Navigation Augmentation System on Luojia-1A Satellite

2 珞珈一号导航增强数据质量分析

本文利用5组导航增强实验的数据对珞珈一

号卫星导航增强数据质量进行分析。由于珞珈一号卫星导航增强信号的频率与现有GNSS信号频率均不相同,需要专用的地面接收天线和接收机对GNSS信号和珞珈一号信号进行采集,表1列出了本次分析使用的珞珈一号数据的信号跟踪情况,其中仰角和跟踪时长均是指能够同时跟踪珞珈一号导航增强H1和H2信号的最低卫星高度角,实际观测到的保持H1信号跟踪的最低卫星仰角为4°。珞珈一号数据采用武汉和石家庄两个地面站进行接收。导航增强实验均采用过境高度角较高的可见弧段,5次实验数据的卫星天空图如图2所示,其中9月22日的实验由于调度问题导致导航增强载荷延迟开机,武汉站仅能收到卫星下降段的部分数据,石家庄站未能收到导航增强数据。

表1 5次导航增强实验的信号跟踪情况

Tab. 1 Summary of Signal Tracking Status in Five Navigation Augmentation Experiments

日期	观测地点	最高仰角 / (°)	最低仰角 / (°)	跟踪时长 / (")
08-25	武汉	64.1	13.9	466
08-25	石家庄	84.8	19.1	352
09-22	武汉	59.2	11.4	288
09-27	武汉	78.7	17.3	378
09-27	石家庄	84.2	24.7	301

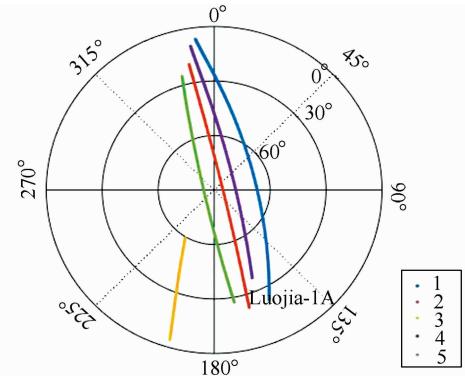


图2 5次实验的珞珈一号卫星天空图

Fig. 2 Skyplot of Luojia-1A Satellite in Five Experiments

5次实验接收到珞珈一号导航增强信号载噪比与卫星高度角的关系如图3所示。图3显示,多次实验中,不同地点实验接收到的信号载噪比变化趋势基本一致。H1与H2频率不同导致自由空间衰减相差约1.4 dB。珞珈一号导航增强信号地面接收载噪比理论值约为53~55 dB Hz。实测H1和H2的最高载噪比分别为49 dB Hz和52 dB Hz,基本满足要求。但是H1信号的高仰角条件下载噪比偏低,而H2信号的低仰角载噪比偏低,该现象主要与接收天线在珞珈信号频

点处的增益不一致有关, 因而珞珈一号地面接收天线性能仍需要根据珞珈一号卫星的信号频点进一步优化。

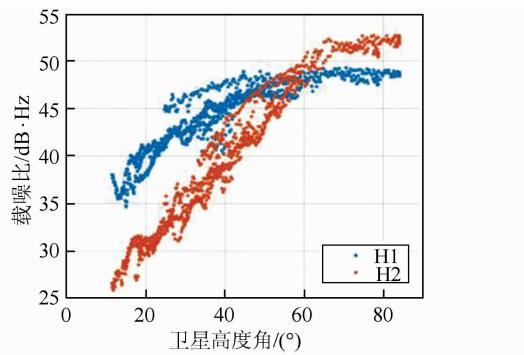


图 3 珞珈一号 01 星导航增强信号载噪比

Fig. 3 The C/N0 of Navigation Augmentation Signal from Luojia-1A Satellite

由于珞珈一号只有一颗卫星在轨, 因而其观测质量评估无法使用短基线和零基线法^[14]。本文对珞珈一号导航增强信号质量评估采用单站单星评估的方法。对于伪距观测值噪声, 采用无几何距离组合进行评估。对于载波相位观测值, 采用历元间差分的无几何距离组合进行噪声评估, 观测噪声可表达为:

$$\begin{cases} \varepsilon_P \approx P_{1,t} - P_{2,t} - \text{ION} \\ \varepsilon_L \approx (L_{1,t} - L_{2,t}) - (L_{1,t-1} - L_{2,t-1}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, ε_P 和 ε_L 分别为伪距和载波相位的噪声。由于珞珈一号单次过境时间仅为几分钟, 因此将无几何距离组合的伪距电离层延迟在过境期间近似地视为常量。且由于单星单站无法分离卫星端和接收机端的码间偏差, 因而在数据处理时将所有频率相关的误差的总和, 包括电离层影响、卫星端和接收机端码偏移定义为电离层延迟(Iono-spheric, ION)。ION 的估计方法为单次过境所有伪距无几何距离组合观测值的平均值。对于载波相位观测值, 对无几何距离组合观测值进一步使用历元间差分法消除模糊度和残余电离层的影响。历元间差分的无几何距离载波相位观测值组合仅受到电离层时间变化率的影响。由于残余的电离层变化率影响较小, 因此在数据处理中忽略不计。利用上述方法估计得到的珞珈一号导航增强信号伪距和载波相位噪声如图 4 所示。

为了进一步量化分析珞珈一号导航增强信号伪距和载波相位噪声, 采用最小范数二次无偏估计法(minimum norm quadratic unbiased estimate, MINQUE)对增强信号的噪声进行建模^[15]。考虑到伪距和载波相位噪声对高度角的依赖, 将伪距和载波相位噪声模型建模为:

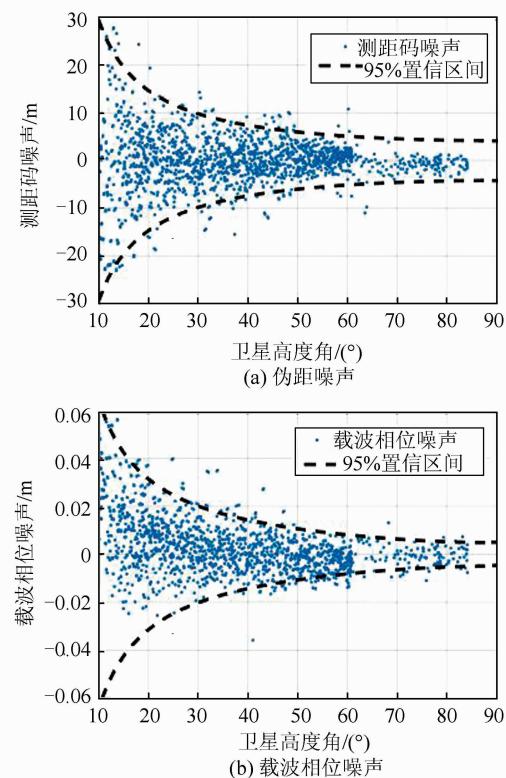


图 4 珞珈一号导航增强信号无几何距离组合噪声评估

Fig. 4 Evaluation of the Luojia-1A Navigation

Augmentation Signal Noise with the

Geometry-Free Combination

$$\sigma^2 = a + \frac{b}{\sin e^2} \quad (2)$$

式中, a 、 b 为待估方差分量; e 为高度角(rad)。采用 MINQUE 法估计得到的方差分量见表 2。根据估计的方差分量求得伪距和载波相位噪声的 95% 置信区间也标注在图 4 中。图 4 显示, 采用 MINQUE 法进行方差建模基本能够反映珞珈一号导航增强信号观测值的误差分布特性。评估得高仰角无几何距离组合的伪距和载波相位的测量噪声分别为 2.1 m 和 2.5 mm。考虑到无几何距离组合将观测值噪声放大 $\sqrt{2}$ 倍, 可得珞珈一号伪距和载波相位原始观测量在高仰角时的观测精度分别为 1.5 m 和 1.7 mm(1 倍中误差)。珞珈一号导航增强信号的伪距和载波相位测量精度都显著地随高度角变化, 一方面因为噪声评估时未能考虑电离层影响与高度角的关系, 另一方面因为接收机在低仰角时的测量精度仍然需要进一步优化。珞珈一号导航增强信号高仰角处载波相位测量精度与 GNSS 信号相当, 但是伪距测量精度仍然偏大, 这是由于低轨卫星与地面固定的接收机天线之间的视线方向加速度远远大于中高轨导航卫星。如何优化测距码环路设计来平衡低轨卫星增强信号的高动态特性和测量精度的关系, 仍然

有待进一步研究。

表2 MINQUE法估计的珞珈一号导航增强观测值方差分量

Tab. 2 Variance Components of Luojia-1A Navigation Augmentation Signals Estimated with MINQUE

项目	a	b
伪距	-2.2	6.56
载波相位/ 10^{-5}	-2.58	3.18

式(1)中定义的电离层延迟对伪距观测噪声评估产生一定的影响,因此需要对其变化特性作进一步分析。在单个弧段内将电离层延迟视为常数,得到的单次卫星过境电离层延迟对无几何距离组合伪距观测值的影响如图5所示。图5显示,不同测站,不同的时间电离层影响各有不同,对无几何距离组合的影响在30 ns左右,对应的对原始伪距观测值的影响大约在80~120 ns之间,与电离层延迟量级相当。同一次实验中,采用不同的接收机跟踪信号对应的电离层延迟差异也比较大,因而图5所示的电离层延迟差异主要是由信号传播路径和地面接收机硬件延迟的变化引起的。另外,低仰角处伪距噪声较大也会对电离层延迟估计产生一定影响。

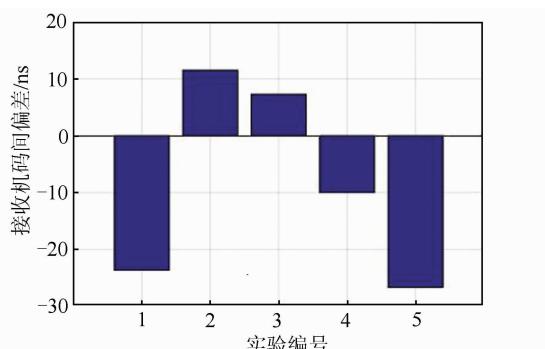


图5 电离层对珞珈一号伪距观测值的影响

Fig. 5 Impact of Ionosphere on Luojia-1A Pseudorange Measurements

3 单星单历元授时精度分析

为了进一步评估珞珈一号导航增强系统与GNSS系统的兼容性,采用单星单历元的方法进行授时精度的评估。由于珞珈一号地面接收机可同时接收GPS/北斗和珞珈一号的观测数据,并且珞珈一号卫星的信号捕获跟踪使用与GPS/北斗相同的时钟,所以地面接收机对应珞珈信号的钟差应该为GPS的时钟加上硬件延迟。星上播发的珞珈信号参考时间是利用星上载荷进行授时获得时间。原理上珞珈一号信号发射时刻应该与

GPS时对齐,但实现上不可避免地会引入发射端的硬件延迟,所以珞珈一号导航增强信号伪距观测模型可表示为:

$$P = \rho + dt_s + db_s - (dt_r + db_r) + I + T + \epsilon \quad (3)$$

式中,P为伪距观测值;ρ为站星几何距离;dt_s和dt_r分别为卫星端和接收机端的GPS钟差,可通过星上和地面的接收机分别求得;db_s和db_r分别为珞珈信号的发射端硬件延迟和接收机端硬件延迟,该延迟的影响需要通过标定来消除;I和T分别为电离层和对流层延迟,在标准定位计算中可以使用经验模型,如Klobuchar模型和Saastamoinen模型修正;ε为随机观测噪声。

在进行单星授时实验时,将天线安装在已知点上,珞珈一号卫星轨道和钟差dt_s可通过广播星历计算,因而几何距离ρ可视为已知。I和T通过经验模型修正,接收机端GPS钟差dt_r可通过接收机单点定位计算求得,则珞珈一号授时观测方程为:

$$db_s - db_r = P - \rho - dt_s + dt_r - I - T + \epsilon \quad (4)$$

式(4)表示扣除各项误差影响后,观测值中剩余的部分是卫星发射端和接收机端的硬件延迟。对于单星单接收机的情况,这两种硬件延迟不可区分,但在卫星过境期间可视为常量。对应的变化部分的方差则为珞珈一号单星授时的精度。根据上述关系,对珞珈一号卫星伪距观测数据进行处理,得到珞珈一号单星授时精度与卫星高度角的关系如图6所示。图6显示珞珈一号卫星伪距信号的硬件延迟总量大约是3 820 ns,该硬件延迟不影响授时精度。从图6可以看出,珞珈一号残余误差随高度角变化有一定的趋势性,使用珞珈一号信号单星授时与使用GPS单点定位授时的差异变化范围在50 ns量级。该趋势可能是由

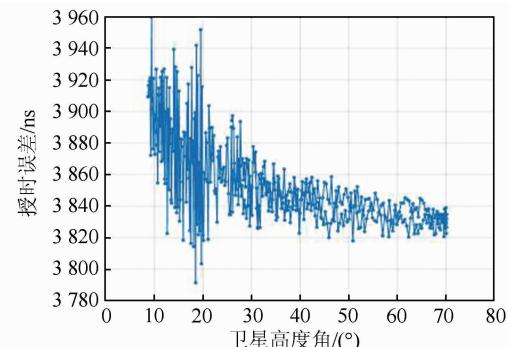


图6 单星授时误差与高度角的关系

Fig. 6 Relationship Between Single LEO Based Timing Error and the Elevation Angle

于残余误差引起的,但仍然有待进一步研究。同时,低仰角时,严重的多路径效应影响授时的精度。为了更客观地评价珞珈一号单星授时精度,对两个授时精度指标进行评定,即高度角大于 30° 时,珞珈一号伪距单星授时精度为 11.3 ns (1倍中误差)。考虑各高度角全部的伪距时,授时精度约为 27.5 ns (1倍中误差)。利用珞珈一号伪距进行单星授时获得的地面对时钟与直接利用GPS信号获得的地面对时钟的差异保持在 $10\sim30\text{ ns}$ 量级,与GPS单星授时精度相当。该结果说明了珞珈一号导航增强系统星上时间系统维持的准确性和珞珈一号伪距观测量的正确性。

4 结语

本文首次分析了基于低轨卫星平台进行导航信号增强的实测数据性能。根据珞珈一号卫星5组实验数据的结果分析,表明珞珈一号导航增强信号的伪距和载波相位测量精度最高可达 1.5 m 和 1.7 mm 。本文还评估了使用珞珈一号单星授时精度。在扣除硬件延迟常数偏差后,导航增强信号的授时与直接GPS授时的差异在 $10\sim30\text{ ns}$ 量级,该结果证明了珞珈一号导航增强信号与现有GPS信号的兼容性以及珞珈一号导航增强系统实现的正确性。珞珈一号导航增强系统能够与现有的北斗/GPS信号协同定位,并起到增强效果。另一方面,珞珈一号导航增强实验结果也反映了低轨导航信号增强方面仍有很多技术问题需要深入研究。通过对珞珈一号导航增强数据的进一步研究,有望进一步提高珞珈一号导航增强信号的授时精度和性能。后续将开展更细致的误差建模和数据特性分析的工作,并利用珞珈一号卫星实测数据开展增强精客单点定位的相关实验,为我国发展低轨卫星导航信号增强系统解决关键技术问题。

参 考 文 献

- [1] Yang Yuanxi. Concepts of Comprehensive PNT and Related Key Technologies[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(5):505-510(杨元喜.综合PNT体系及其关键技术[J].测绘学报,2016,45(5):505-510)
- [2] Yang Yuanxi. Resilient PNT Concept Frame[J]. *Acta Geodaetica et Cartographic Sinica*, 2018, 47(7):893-898(杨元喜.弹性PNT基本框架[J].测绘学报,2018,47(7):893-898)
- [3] Li Deren, Shen Xin, Li Dilong, et al. On Civil-Military Integrated Space-Based Real-Time Information Service System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(11):1 501-1 505(李德仁,沈欣,李迪龙,等.论军民融合的卫星通信、遥感、导航一体天基信息实时服务系统[J].武汉大学学报·信息科学版,2017,42(11):1 501-1 505)
- [4] Montillet J P, Bonenberg L K, Hancock C M, et al. On the Improvements of the Single Point Positioning Accuracy with Locata Technology[J]. *GPS Solutions*, 2013, 18(2): 273-282
- [5] Montillet J P, Roberts G W, Hancock C, et al. Deploying a Locata Network to Enable Precise Positioning in Urban Canyons[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(2):91-103
- [6] Jardak N, Samama N. Indoor Positioning Based on GPS-Repeaters: Performance Enhancement Using an Open Code Loop Architecture[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(1):347-359
- [7] Chen L, Piché R, Kuusniemi H, et al. Adaptive Mobile Tracking in Unknown Non-Line-of-Sight Conditions with Application to Digital TV Networks [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2014, 2014:22
- [8] Chen C, Han Y, Chen Y Z, et al. Indoor Global Positioning System with Centimeter Accuracy Using Wi-Fi[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2016, 33(6):128-134
- [9] de Blasio G, Quesada-Arencibia A, García C, et al. Study on an Indoor Positioning System for Harsh Environments Based on Wi-Fi and Bluetooth Low Energy[J]. *Sensors*, 2017, 17(6):1 299
- [10] del Peral-Rosado J A, Raulefs R, Lopez-Salcedo J A, et al. Survey of Cellular Mobile Radio Localization Methods: From 1 G to 5 G[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(2):1 124-1 148
- [11] 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
- [12] Li Bofeng, Ge Haibo, Ge Maorong, et al. LEO Enhanced Global Navigation Satellite System (LeGNSS) for Real-Time Precise Positioning Services[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61: 2 942-2 954
- [13] Li Xingxing, Ma Fujian, Li Xin, et al. LEO Constellation-Augmented Multi-GNSS for Rapid PPP Convergence[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, DOI: 10.1007/s00190-018-1195-2

- [14] Wang L, Feng Y, Wang C. Real-Time Assessment of GNSS Observation Noise with Single Receivers [J]. *Journal of Global Positioning Systems*, 2013, 12:73-82
- [15] Rao C R. Estimation of Variance and Covariance Components—MINQUE Theory [J]. *Journal of Multivariate Analysis*, 1971,1(3):257-275

Quality Assessment of the LEO Navigation Augmentation Signals from Luojia-1A Satellite

WANG Lei^{1,2} CHEN Ruizhi^{1,2} LI Deren^{1,2} YU Baoguo³ WU Cailun³

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University,
Wuhan 430079, China

2 Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

3 State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology, Shijiazhuang 050200, China

Abstract: Navigation signal augmentation from low earth orbit (LEO) can improve the slow convergence and weak signal problem of the high/medium earth orbit navigation satellites, so it plays an important role in next generation navigation technique. Luojia-1A scientific experimental satellite developed by Wuhan University carried the navigation augmentation payload, and it is capable of automatically calculating its orbit and clock by it self, generating and transmitting dual-frequency ranging signals. Luojia-1A satellite successfully demonstrates the navigation signal augmentation from LEO platform. This paper assesses the quality of the navigation augmentation signals from Luojia-1A from C/N0, precision of pseudorange and carrier phase and timing precision from single satellite. The results indicates the precision of the pseudorange and carrier phase at high elevation angle is 1.5 m and 1.7 mm respectively, which can meet the requirement of the navigation signal augmentation. Single satellite based timing precision from Luojia-1A is approximately 10-30 ns, which proves the correctness and validity of the satellite-ground ranging signals.

Key words: navigation augmentation; low earth orbit navigation; Luojia-1A satellite; navigation signal augmentation; signal quality

First author: WANG Lei, postdoctoral fellow, PhD, his research interest includes LEO based satellite navigation augmentation, GNSS precise positioning and orbit determination. E-mail: lei.wang@whu.edu.cn

Corresponding author: CHEN Ruizhi, professor. E-mail: ruzhi.chen@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 91638203, 41704002; China Postdoc Science Foundation, No. 2017M620337; the Fundamental Research Funds for the Central Universities.