

低轨卫星导航增强技术——机遇与挑战

王磊^{1,2}, 李德仁^{1,2}, 陈锐志^{1,2}, 付文举¹, 沈欣^{1,2}, 江昊^{2,3}

(1. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079; 2. 地球空间信息技术协同创新中心, 武汉 430079; 3. 武汉大学电子信息学院, 武汉 430079)

摘要: 在我国北斗卫星导航系统(北斗系统)初步实现全球能力覆盖的背景下,低轨卫星导航增强(LEO-NA)技术因其易于与北斗系统协同来提高全球自主导航精度、拓展全球卫星导航应用市场的巨大潜力而成为研究热点。本文梳理了发展导航增强技术的现实需求,分析了导航增强技术以及LEO-NA技术的发展现状,重点介绍了我国“珞珈一号”关键技术在校验证的进展情况。在此基础上,研判了LEO-NA系统未来发展面临的技术挑战,如导航增强频率的兼容互操作、通信/导航信号一体化设计、低轨卫星星座管控、高动态导航增强信号捕获与跟踪、与现有导航系统的融合等。研究提出,针对我国发展LEO-NA技术的迫切需求,可着重在以下方面开展工作:加强系统顶层设计并充分利用现有资源,注重LEO-NA系统与北斗系统的协同增效;促进通信、导航、遥感功能融合,分步骤分层次构建天基信息实时服务系统;将卫星工程与地面基础设施统一规划考虑,实行星地一体化建设。

关键词: 卫星导航增强; 低轨卫星星座; 北斗系统; 协同建设; 星地一体化

中图分类号: P231 **文献标识码:** A

Low Earth Orbiter (LEO) Navigation Augmentation: Opportunities and Challenges

Wang Lei^{1,2}, Li Deren^{1,2}, Chen Ruizhi^{1,2}, Fu Wenju¹, Shen Xin^{1,2}, Jiang Hao^{2,3}

(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. Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: As China's Beidou satellite navigation system (Beidou system) achieves a primary global coverage, the low earth orbiter navigation augmentation (LEO-NA) technique becomes a hot research topic, since it can easily cooperate with the Beidou system to improve the precision for global autonomous navigation and to extend the application market of the global navigation satellite systems (GNSS). This paper analyzed the demand for and status of the LEO-NA technique, and focused on the in-orbit validation of key techniques for the "Luojia-1A" satellite. It also studied the challenges faced by the LEO-NA system, including interoperability of signal frequencies after navigation augmentation, integrated design of the communication and navigation signals, control and management of the LEO constellations, acquisition and tracking of the high-dynamic augmented signals, and integration with existing GNSS systems. Considering the pressing demand for the LEO-NA techniques, the following suggestions are proposed, including enhancing the top-level design of the LEO-NA system while focusing on the synergy of the LEO-NA and Beidou systems; promoting the integration of the communications, navigation, and remote sensing functions, and building the space-based real-time service system in a stepwise and stratified manner; and planning and constructing the satellite project and the ground infrastructure in an integrated manner.

收稿日期: 2019-09-27; 修回日期: 2020-02-28

通讯作者: 李德仁, 武汉大学教授, 中国工程院院士, 中国科学院院士, 研究方向为地球空间信息学; E-mail: drli@whu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“天基信息实时服务系统(PNTRC)发展战略研究”(2017-ZD-01)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

Keywords: satellite navigation augmentation; low earth orbiter constellation; Beidou system; collaborative development; satellite-ground integration

一、前言

“北斗三号”卫星导航系统完成了核心星座部署,形成面向全球用户提供导航定位、星基增强、精密定位信息播发、短报文通信和国际搜救等多类服务的能力,标志着我国北斗卫星导航系统(北斗系统,BDS)从区域走向全球[1]。针对国内的北斗用户,我国建设了地基增强系统和众多的增强站与基准站,服务于船舶监管与搜救、城市物流配送、沿海精密定位服务、共享自行车监管、网约车监管等多个领域。后续,进一步提升北斗系统的导航定位服务性能、扩大全球应用市场,将是我国卫星导航产业高质量发展所面临的重要挑战。

当前,全球导航卫星系统(GNSS)处于难以使用某一种特定的导航技术来解决全部服务需求的困境。因此,新一代定位、导航、授时(PNT)系统需要综合多种技术,如轨道多样性、非卫星导航等[2],才能显著增强服务能力的全面性。Parkinson等[3]针对目前GNSS系统的脆弱性提出了保护、优化、增强(PTA)对策,包括星基增强技术,地基的伪卫星技术、测距技术和增强型“罗兰”(eLoran)技术。杨元喜[2,4]倡导的综合PNT系统和弹性PNT系统概念,将低轨卫星增强技术和多源导航融合技术视为核心技术选项。李德仁等[5,6]论证了构建空/天/地一体化、集成通信、导航、遥感功能的天基信息实时智能服务系统(PNTRC),提出了低轨卫星导航增强(LEO-NA)技术设想;一方面导航增强技术可为低轨卫星提供高精度时空基准,另一方面低轨卫星导航增强能为用户提供实时高精度定位服务,提升通信和遥感服务的效能。LEO-NA技术融入北斗系统后,将协同提供全球范围的高可用、高连续性、高完好性和快速收敛的高精度定位服务能力。

为此,本文围绕LEO-NA技术发展面临的机遇与挑战这一主题,开展技术需求分析、发展现状梳理、我国关键技术轨验证、未来发展判断等研究,

以期为我国卫星导航产业的高质量发展提供部分理论借鉴。

二、导航增强技术概况

(一) 我国需求分析

1. 实现全球定位服务更高性能的需求

目前,北斗系统能够提供覆盖全球范围的米级基本导航服务、覆盖国土周边区域的星基增强和广域精密单点定位(PPP)服务。依托中高轨导航卫星的PPP定位,受到卫星与地面用户之间几何构型变化缓慢的影响,一般需要30 min甚至更长时间的收敛过程才能实现厘米级的定位。如采用低轨卫星进行PPP定位服务,可将收敛过程耗时压缩至分钟级[7]。因此,北斗系统未来在全球导航定位服务方面的能力提升,需要利用低轨卫星辅助、对其基本导航服务的性能进行升级。

2. 提升北斗系统国际竞争力的需求

全球导航定位服务市场中,美国全球定位系统(GPS)、俄罗斯全球卫星导航系统(GLONASS)、欧洲伽利略卫星导航系统(GALILEO)以及若干区域卫星导航系统(RNSS)的基础能力重叠明显,且不断提升各自服务能力以加强国际竞争力。我国是继美国、俄罗斯之后第三个提供全球导航定位服务的国家,为参与国际竞争并取得优势,北斗系统在满足国内导航需求的基础上,还需面向全球市场,从定位精度、易用性、连续性、可靠性、抗干扰能力和完好性等方面来提升导航服务能力。导航增强技术是北斗系统应对上述需求的可行解决方案。

3. 扩展PNT服务综合性能的需求

PNT服务体系作为国家基础设施和重要战略资源,从国家安全的角度来看,需要由多源异构的导航源形成空/天/地/海一体化的综合能力,弹性、坚韧性和抗毁性是其可靠应用的重要方面。未来PNT服务将不能完全依赖北斗系统,需要资源分散、能力互补的备份方案。从服务的角度来看,导航增强服务可作为北斗系统的扩展、补充和备份,在北

斗系统基本导航服务无法满足应用需求的特殊场景下，发挥功能等效的关键作用。

4. 构建 PNTRC 来提升“通导遥”一体化协同服务能力的需求

从我国 PNTRC 构建的角度来看，遥感和通信这两类服务需要与导航增强服务进行功能融合，以实现协同增效 [8]。通过导航、遥感、通信等天基信息服务之间的相互协同、相互支撑，可以构建集空间信息获取、传输、处理、指挥控制于一体的实时服务系统，形成空间信息产业协同创新的新格局。这是我国由航天大国向航天强国跨越转变的迫切需要和能力标杆。

(二) 国内外发展现状

导航增强技术不是新兴概念，发展历程较长，泛指用于提升卫星导航系统服务能力的各种技术方案。现有卫星导航增强系统的分类见图 1，主要有信息型增强系统和信号型增强系统两大类 [9]。

1. 信息型增强系统

信息型增强系统通过地面监测站计算误差改正数或完好性信息，将这些数据播发给用户，由

用户接收后辅助提升定位精度或服务完好性。这类服务的特点在于，导航定位仍然使用现有的卫星导航信号，而增强信息通过天基或地基通信链路来传输。

从增强信息的传输方式来看，信息型增强系统可分为地基增强和星基增强两种方式。①地基增强方式利用地面互联网、无线电台或移动通信网络来传输改正信息，如国家北斗地基增强网 (NBASS) [10]、千寻地基增强网、省市级北斗地基增强网等。②星基增强方式通过租用通信卫星的广播信道以实现大范围的广播，改正数播发不依赖于地面通信设施，覆盖范围更广。目前多数星基增强系统提供全球精密单点定位服务，可实现厘米级定位精度 (见表 1)；但在没有区域增强的条件下，精密单点定位的收敛过程往往耗时较长。此外，不同服务提供商的星基增强系统往往需要使用专用的接收机，跨系统的兼容互操作比较困难。

从增强信息的内容来看，星基信息增强系统可分为完好性增强和精度增强两种类型。①完好性增强系统主要面向民用航空行业，用于提供更高的导航完好性，也可一定程度上提升导航定位的精度

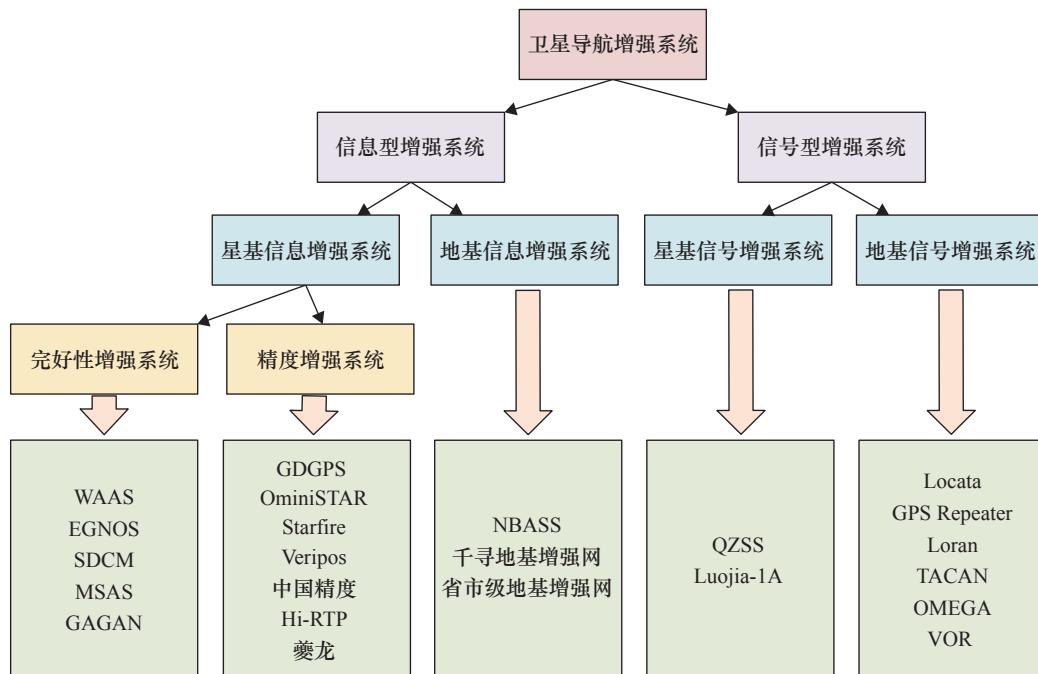


图 1 卫星导航增强系统的分类及典型导航增强系统 [11~15]

注：WAAS 表示美国广域增强系统；EGNOS 表示欧洲欧洲地球静止导航重叠服务；SDCM 表示俄罗斯差分改正监测系统；MSAS 表示日本多功能卫星增强系统；GAGAN 表示印度 GPS 辅助型静地轨道增强导航系统；GDGPS 表示全球差分 GPS 系统；NBASS 表示国家北斗地基增强网；QZSS 表示日本准天顶卫星系统；Luoja-1A 表示中国“珞珈一号”低轨卫星导航增强卫星；Loran 表示远距离无线电导航系统；TACAN 表示战术空中导航系统；OMEGA 表示超远程连续波双曲线相位差无线电导航系统；VOR 表示甚高频全向信标导航系统。

(米级至亚米级)。②精度增强系统主要播发实时的精密轨道钟差产品,用于提供精密定位服务;还有播发载波相位小数偏差、区域电离层和对流层增强等信息。

2. 信号型增强系统

信号型增强系统中,导航增强源能够产生测距信号并与现有 GNSS 信号进行联合定位,从而提升卫星导航服务的可用性、可靠性和连续性。信号型增强系统主要分为地基增强和星基增强两大类。

地基信号增强系统能够解决城市峡谷、露天矿、树林、室内、地下空间甚至水下的定位问题,有效扩展了卫星导航系统的服务范围和应用场景。澳大利亚 Locata 系统 [16~18] 作为地面伪卫星系统,是典型的地基信号增强系统。

星基信号增强系统利用非导航卫星产生测距信号,与导航卫星系统协同提供导航服务。典型代表是日本准天顶卫星系统(QZSS),采用了倾斜地球同步轨道(IGSO)[19]。基于中高轨导航卫星的卫星定位系统由于站/星几何构型变化缓慢,导致精密定位收敛时间较长。而低轨卫星平台用作导航信号增强源具有独特优势:星/地相对几何关系变化较快,有助于精密定位过程的快速收敛。

三、LEO-NA 技术进展

近年来,低轨通信星座的创新概念与方案不断涌现,学术界和产业界对依托低轨卫星星座的导航增强系统的关注度越来越高。LEO-NA 卫星平台既可提供信息增强服务,也可提供信号增强服务。一方面,LEO-NA 卫星基于低轨通信星座的通信能

力,可提供高带宽、低延时的 GNSS 差分信息增强服务;另一方面,LEO-NA 卫星作为导航信号增强源,能够有效缩短精密定位的收敛时间,提升导航服务的可用性和可靠性。对于北斗系统而言,LEO-NA 卫星作为移动监测站,辅助提升北斗 GEO 卫星的定轨精度,规避了全球建设北斗地面站的难题 [20,21],有助于提升和完善北斗系统的全球服务性能。除此之外,LEO-NA 技术也是弹性 PNT 框架 [4] 和综合 PNT 体系 [2] 的重要组成部分。

(一) 国外发展情况

在早期,国外重点研究并验证了 LEO 卫星在提高实时动态(RTK)性能方面的潜力 [22]。2002 年,美国波音公司提出了将 GPS 与铱星系统相结合的增强导航系统(iGPS)方案,实质上是一个近地轨道/中轨道卫星相结合的导航与授时系统 [23]。2007 年,波音公司完成了 iGPS 抗干扰试验,良好的实测结果促成了第二代铱星系统(Iridium Next)的建设。

2016 年 5 月,铱星公司宣布开通卫星时间和位置(STL)服务,铱星系统利用下行的信令信道波束来实现导航增强信号的播发,其卫星信号功率增强了 25~30 dB,大幅度提升了抗干扰能力。据报道 [24,25],铱星 STL 服务的公开定位精度为 20~50 m,授时精度约为 50 ns;虽然铱星 STL 服务在精度方面尚不能与 GNSS 定位相提并论,但其优势在于位置认证和抗干扰能力。随着大规模低轨通信星座计划的提出,国外团队完成了基于未来宽带 LEO 星座的导航增强服务性能仿真分析 [26,27],但尚未见国外低轨宽带通信星座运营方宣称提供导航增强服务。

表 1 国内外星基信息增强系统性能对比

系统名称	运营方	建立时间/年	定位精度/cm	星座	收敛时间/min
全球差分 GPS 系统(GDGPS)	美国喷气推进实验室(JPL)	2000	10	G	—
OmniSTAR 系统(HP 服务)	美国 OmniSTAR 公司 (现 Trimble 公司)	—	10	GR	<35
星火系统(StarFire)	美国 NavCom 公司	2011	5	GR	—
CenterPoint RTX 系统	美国 Trimble 公司	2011	10	GRBEQ	<15
Veripos 系统(APEX 5 服务)	英国 Veripos 公司	—	5(H) 12(V)	GRBEQ	—
中国精度系统(ATLAS)	中国合众思壮科技股份有限公司	2015	4	GRB	—
中海达星基增强系统(Hi-RTP)	中海达卫星导航技术股份有限公司	2018	4	GRBE	<30

注:星座的字母组合中,G表示GPS,R表示GLONASS,B表示BDS,E表示GALILEO,Q表示QZSS。

（二）国内研究进展

1. 依托铱星座的导航性能仿真分析

基于 LEO-NA 技术拓展 GNSS 信号全球监测效能的研究，为低轨星座搭载 GNSS 监测接收机开展全球天基监测提供了理论依据。基本研究思路是将铱星座视为导航卫星系统，开展 GNSS 系统与低轨卫星星座协同工作时的基本导航性能分析，获得可见卫星数、精度衰减因子、伪距定位精度和完好性等性能数据。文献 [28~30] 采用仿真方法研究了铱星增强 GPS 系统后的抗干扰、完好性、可用性和精度，显示了低轨增强的潜力。文献 [31] 分析了基于 LEO-NA 技术的北斗系统抗干扰性能，播发的导航增强信号可以容忍约 50 dB 的干信比，显著提高了系统抗干扰能力。基于铱星增强的 GPS 系统接收机自主完好性监测 (RAIM) 性能、LEO-NA 技术对北斗系统 RAIM 检测率和识别率的增强效果等方面也有研究涉及 [32]。

2. 低轨星座加速 PPP 收敛的仿真分析

随着 PPP 技术的发展和成熟，低轨卫星有望从根本上解决 PPP 收敛速度过慢的问题。现有研究表明 [33,34]，在 GPS、GLONASS、GALILEO、BDS 全球导航系统正常运行的情况下，若采用 288 颗 LEO-NA 卫星进行增强，首次固定时间从 7.1 min 显著改善到 0.7 min，PPP 收敛时间可缩短至 1.3 min；对于单一 BDS 系统，PPP 收敛时间也可压缩至 3.0 min，且模糊度固定效率也可进一步改

善；低轨卫星对 PPP 收敛时间的贡献主要取决于可视的低轨卫星个数，（见图 2）。另外，LEO-NA 卫星的广播电文参数也是研究热点 [27,35,36]。低轨卫星受到的轨道摄动力比传统导航卫星更为复杂，现有的导航卫星广播星历模型不能直接应用到低轨卫星的星历拟合中，为此有学者提出了状态参数拓展的轨道状态型 LEO 广播星历模型 [35]。

3. LEO-NA 关键技术是在轨验证

北斗系统投入运行后，如何进一步提升导航服务的综合性能成为新的研究亟需。国内部分高校、科研院所和商业公司高度重视 LEO-NA 系统的关键技术攻关和在轨试验，期望通过技术验证来完善技术体系，为 LEO-NA 系统的工程建设“铺平道路”。代表性的工作有：武汉大学牵头研制的“珞珈一号”科学实验卫星 [37]，东方红卫星移动通信有限公司建设运营的“鸿雁”星座首颗实验星 [38]，中国电子科技集团公司第五十四研究所牵头研制的“网通一号” A、B 双星，这些卫星在轨试验的成功进行，体现了我国 LEO-NA 技术在关键原理、体制验证等方面的实质性进展。

四、“珞珈一号”关键技术验证

（一）卫星平台和导航增强载荷

“珞珈一号”科学实验卫星主要用于开展夜光遥感和 LEO-NA 技术的在轨试验（见图 3）。卫星

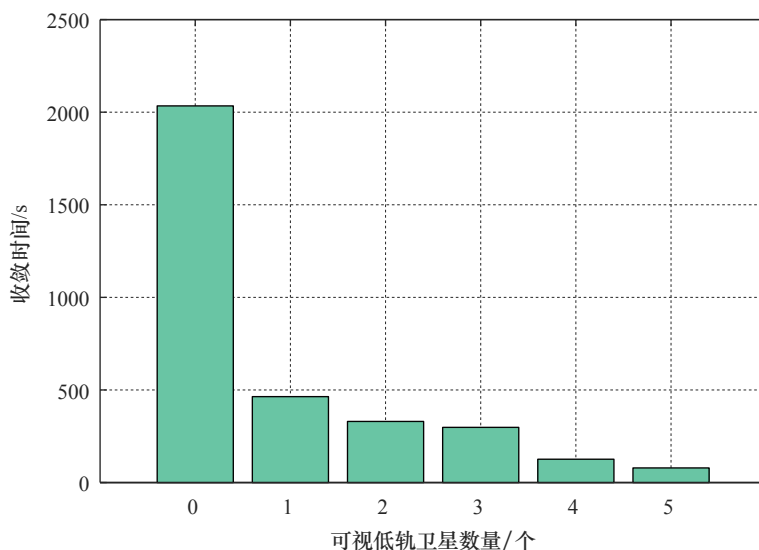


图 2 PPP 收敛时间与可视低轨卫星数的关系

配置了 2 套 GPS/BDS 接收天线, 可接收 GPS、北斗双模四频观测数据, 用于在轨数据处理、精密轨道和时钟信息计算, 生成双频测距信息播发至地面。地面接收机同时接收 GPS、北斗、“珞珈一号”的测距信号, 进行联合定位以提升定位性能, 尤其是缩短 PPP 收敛时间。

“珞珈一号”配置的适用于微小卫星搭载的专用导航增强载荷, 在星上信号收发隔离、星上高精度时间维持、载荷小型化、低功耗设计等关键技术方面取得了突破。地面配置的接收机样机为全新研制, 根据 LEO-NA 信号的特性进行了优化, 提升了低轨卫星捕获灵敏度和跟踪精度, 并可同时捕获和跟踪 GPS、北斗导航信号以及“珞珈一号”导航增强信号(见图 4)。

(二) 在轨试验结果

“珞珈一号”科学实验卫星成功完成在轨导航增强技术试验, 地面接收机成功捕获并跟踪 LEO-NA 信号, 实现了导航增强信号载噪比的大幅提升。卫星信号过境期间的天空图和双频导航增强信号的载噪比见图 5, 体现了珞珈一号双频导航增强信号(H1 信号和 H2 信号)跟踪的连续和稳定。试验过程中, “珞珈一号”卫星信号载噪比始终处于正常区间, 由此体现了“珞珈一号”卫星 LEO-NA 方案的技术可行性。另外, “珞珈一号”卫星的双频信号评估表明, 导航增强信号的伪距和载波相位的测量精度, 与卫星高度角之间存在显著的相关性; 利用低成本晶振所产生的导航增强信号, 对其载波相位的观测精度也达到了毫米级。“珞珈一号”卫星的导航增强信号质量满足设计指标要求, 为我国 LEO-NA 技术领域积累了第一手的实测数据和在轨

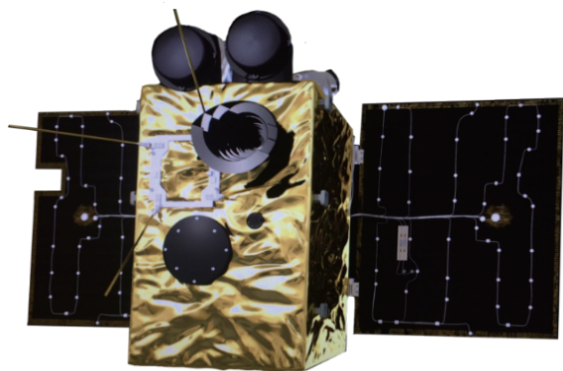


图 3 “珞珈一号”科学实验卫星外形图

测试经验 [37,39]。

综合来看, “珞珈一号”卫星导航增强实验在载荷设计、信号体制设计、关键元器件选型与指标论证、低轨导航增强信号接收机设计、信号监测与评估以及 LEO-NA 数据处理等多个方面取得重要进展, 为我国未来 LEO-NA 系统的建设提供了借鉴。

五、LEO-NA 技术未来挑战

目前, LEO-NA 技术研究整体上仍处于技术验证和技术攻关阶段, 尽管部分关键技术已取得突破, 但在技术体系完善、系统建设运营等方面还面临着若干技术挑战。

1. 导航增强频率的兼容互操作

目前, L 频段已经没有空余的频率资源供导航增强使用, 因此 LEO-NA 系统建设必须考虑与现有卫星导航系统信号的兼容互操作, 具体包括: 频带选择, 信号功率控制, 落地电平控制, 信号带外抑制、杂散抑制、互调干扰的控制, 卫星端信号的收发隔离等, 由此确保在提供 LEO-NA 服务的同时, 不会干扰现有卫星导航系统的正常使用。

2. 通信和导航信号的一体化融合设计

导航与通信在信号层面的融合, 是解决导航信号频谱资源紧张, 信号功率增强和高带宽信息传输



图 4 “珞珈一号” LEO-NA 载荷(上)和地面接收机(下)

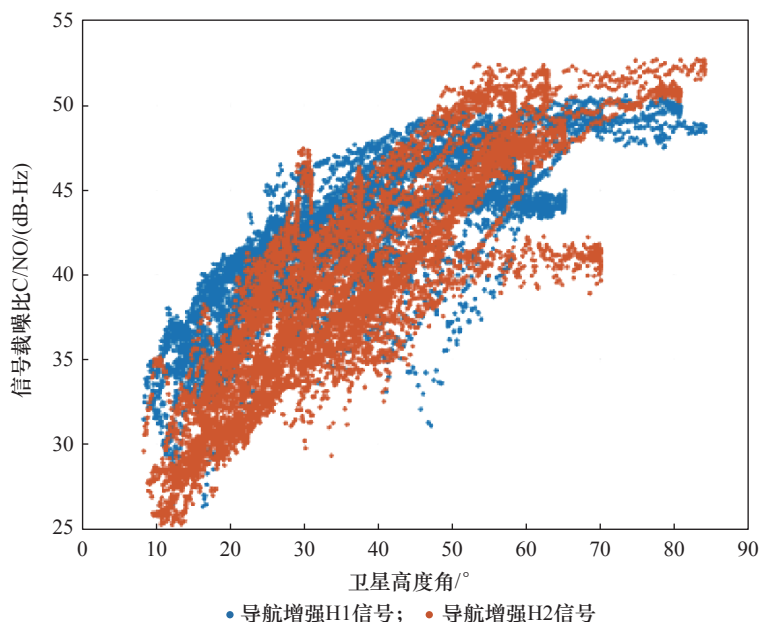


图5 “珞珈一号”卫星导航增强信号载噪比

受限的主要方向。然而，LEO 卫星的通信链路与导航链路，其需求和技术途径差异显著，需要开展技术攻关以推动融合应用。通信信号通常采用空分复用、时分复用、频分复用和码分复用等多种复用方式，以最大程度地提升有效通信带宽和点对点服务；而导航信号需要考虑结合复杂的通信协议来实现高精度的导航定位服务。

3. 导航增强信号的误差建模

对于 LEO-NA 信号的误差源建模，不能简单套用目前 GNSS 信号的误差建模方法，应深入展开研究。相比 GNSS 卫星，LEO 卫星的导航增强载荷、元器件及所处空间环境存在一定差异，导致导航增强信号的硬件延迟时变特性也有所不同。另外，LEO-NA 系统的时空基准维持方式、运动特性和信号传播路径上的大气延迟特性等，都异于当前的 GNSS 信号。

4. 低轨卫星星座的运行管控

未来的 LEO-NA 星座计划都是包含有数百颗卫星的大型星座，且同轨和异轨卫星之间需要分别建立星间通信链路，由此带来的星座管控问题将异常复杂。目前在轨运行的低轨通信星座，如铱星星座和全球星星座分别仅有几十颗卫星，问题处理相对简便。因此，亟需构建长期连续运行、稳健的卫星测运控机制和指标评价体系，通过开展星座维持、故障恢复、资源调度、负载均衡和地面站优化等技

术攻关，形成与大规模低轨通信星座需求相适应的地面运行管控支持能力。

5. LEO 卫星高动态导航增强信号的捕获跟踪

LEO 卫星平台距离地面近、运动速度快，使得卫星导航信号的视线方向多普勒变化与加速度变化范围都大于中高轨卫星。在 LEO-NA 地面接收机的方案设计中，需关注高动态导航信号的捕获灵敏度问题，采取多种途径来保持并提升信号跟踪精度这一关键因素 [39,40]。

6. 与北斗系统的融合和协同

LEO-NA 系统既是对现有北斗系统的扩展和增强，又是其导航功能的备份和补充，因而 LEO 卫星在未来综合导航系统中扮演着“用户”“信号源”双重角色。鉴于低轨星座规模庞大、星间链路复杂、过境测控时间窗口短的现状，应进一步开展 LEO-NA 系统和北斗系统之间的集成架构优化设计，以高质量地实现兼容互操作、时空基准统一、星地接口统一，同时兼顾各自星座的自主维持能力。

六、对策建议

通过北斗系统的建设和运行，我国在卫星导航领域积累了较为丰富的经验，形成了一批优秀的人才队伍。LEO-NA 技术是北斗系统进一步提升导航服务性能、通过“弯道超车”以拓展全球市场的重

要发展方向。以“珞珈一号”科学实验卫星取得的关键技术突破为代表,我国在 LEO-NA 技术领域的研究取得了可喜的进展。着眼未来相关系统的工程建设和高效运营,LEO-NA 技术领域仍然面临着不少技术性和工程化的实际挑战,为此本文针对性提出我国 LEO-NA 系统建设方面的发展建议。

(1) 加强系统顶层设计并充分利用现有资源,处理好 LEO-NA 系统与北斗系统的错位关系,注重两个系统的协同增效。LEO-NA 系统作为大规模的低轨星座,涉及复杂的星间链路设计,宜充分利用和借鉴我国现有卫星平台及空间信息载荷的研发资源,以优化、高效、协同地解决系统建设的各方面问题。

(2) 推进通信、导航、遥感功能融合,分步骤分层次构建 PNTRC 系统。协同发展我国的通信、导航、遥感技术,构建一星多用、多星组网的低轨星座,从而节约星座建设成本和频谱资源、提升综合服务能力。考虑到低轨星座规模较大且复杂性强的特点,建议借鉴北斗系统建设的成功经验,分步骤建设 PNTRC 系统;针对通信、导航、遥感功能对空间轨道、卫星平台和业务模式的需求差异性,构建多层次、多模式的混合星座,最大化发挥协同运行的效能。

(3) 将卫星工程与地面基础设施统一规划,实行星地一体化建设。通过顶层架构和规划设计的一体化,避免出现“卫星等地面”的不利局面,消除地面测运控站、信关站成为大系统效能“瓶颈”的可能性。注重采用和发挥云计算、大数据、第五代移动通信等新技术的优势,优化系统架构、拓展服务范围,提升 PNTRC 的综合效能。

参考文献

[1] 郭树人,蔡洪亮,孟轶男,等.北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J].测绘学报,2019,48(7):810-821.
Guo S R, Cai H L, Meng Y N, et al. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(7): 810-821.

[2] 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 Y X. Concepts of comprehensive PNT and related key technologies [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(5): 505-510.

[3] Parkinson B W. Assured PNT for our future: PTA [EB/OL]. (2014-09-01) [2018-08-21]. <https://www.gpsworld.com/assured-pnt-for-our-future-pta/>.

[4] 杨元喜.弹性PNT基本框架[J].测绘学报,2018,47(7):893-898.
Yang Y X. Resilient PNT concept frame [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(7): 893-898.

[5] 李德仁,沈欣,李迪龙,等.军民融合的卫星通信、遥感、导航一体地基信息实时服务系统[J].武汉大学学报(信息科学版),2017,42(11):1501-1505.
Li D R, Shen X, Li D L, et al. On civil-military integrated space-based real-time information service system [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(11): 1501-1505.

[6] 李德仁,沈欣,龚健雅,等.论我国空间信息网络的构建[J].武汉大学学报(信息科学版),2015,40(6):711-715,766.
Li D R, Shen X, Gong J Y, et al. On construction of China's space information network [J]. Geomatics and Information science of Wuhan University, 2015, 40(6): 711-715, 766.

[7] 郭树人,刘成,高为广,等.卫星导航增强系统建设与发展[J].全球定位系统,2019,44(2):1-12.
Guo S R, Liu C, Gao W G, et al. Construction and development of satellite navigation augmentation systems [J]. GNSS World of China, 2019, 44(2): 1-12.

[8] 陈锐志,王磊,李德仁,等.导航与遥感技术融合综述[J].测绘学报,2019,48(12):1507-1522.
Chen R Z, Wang L, Li D R, et al. A survey on the fusion of the navigation and the remote sensing techniques [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(12): 1507-1522.

[9] 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.
Wang L, Chen R Z, Li D R, 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.

[10] Shi C, Zheng F, Lou Y D, et al. National BDS augmentation service system (NBASS) of China: Progress and assessment [J]. Remote Sensing, 2017, 9(8): 1-16.

[11] 赵爽.国外卫星导航星基增强系统发展概况[J].卫星应用,2013(5):58-61.
Zhao S. The development on satellite-based augmentation system in foreign countries [J]. Satellite Application, 2013 (5): 58-61.

[12] Bar-Sever Y, Young L, Stocklin F, et al. The NASA global differential GPS system (GDGPS) and the TDRSS augmentation service for satellites (TASS) [C]. Noordwijk: ESA 2nd Workshop on Navigation User Equipment, 2004.

[13] Visser I H. Omnistar HP worldwide positioning service [J]. Interexpo Geo-Siberia, 2006, 1(2): 108-116.

[14] Chen X M, Allison T, Cao W, et al. Trimble RTX, An innovative new approach for network RTK [C]. Portland: ION GNSS+ 2011, 2011.

[15] 郭四清,张丁.星基增强系统“中国精度”与CORS网的对比分析[J].地理空间信息,2016,14(5):1-4.
Guo S Q, Zhang D. Comparison analysis of satellite-based augmentation system “China CM” and CORS [J]. Geospatial Information, 2016, 14(5): 1-4.

[16] Jiang W, Li Y, Rizos C. Locata-based precise point positioning for kinematic maritime applications [J]. GPS Solutions, 2014, 19(1): 117-128.

- [17] 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.
- [18] Zhou Z B, Yang L, Li Y. An adaptive dual Kalman filtering algorithm for Locata/GPS/INS integrated navigation [C]. Wuhan: China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings, 2013.
- [19] Choy S, Harima K, Li Y, et al. GPS precise point positioning with the Japanese Quasi-Zenith satellite system LEX augmentation corrections [J]. *Journal of Navigation*, 2015, 68(4): 1–15.
- [20] 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.
Yang Y F, Yang Y X, Xu J Y, 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.
- [21] 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.
Zeng T, Sui L F, Jia X L, 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.
- [22] Enge P K, Talbot N C, San J. Method and receiver using a low earth orbiting satellite signal to augment the global positioning system: US5812961 [P/OL]. 1995-12-28 [2019-06-01]. <https://patents.google.com/patent/US5812961A/en>.
- [23] Whelan D, Enge P, Gutt G M. iGPS: Integrated nav & com augmentation of GPS [C]. Stanford: 2010 PNT Challenges and Opportunities Symposium, 2010.
- [24] Tan Z Z, Qin H L, Cong L, et al. New method for positioning using IRIDIUM satellite signals of opportunity [J]. *IEEE Access*, 2019 (7): 83412–83423.
- [25] 秦红磊, 谭滋中, 丛丽, 等. 基于铱星机会信号的定位技术研究 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2019, 45(9): 1691–1699.
Qin H L, Tan Z Z, Cong L, et al. Positioning technology based on IRIDIUM signals of opportunity [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019, 45(9): 1691–1699.
- [26] Reid T, Neish A, Walter T, et al. Leveraging commercial broadband LEO constellations for navigation [C]. Portland: ION GNSS+ 2016, 2016.
- [27] Reid T, Walter T, Enge P, et al. Orbital representations for the next generation of satellite-based augmentation systems [J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(4): 737–750.
- [28] 刘仁甫, 田世伟, 李广侠, 等. Iridium/GPS导航增强系统及性能仿真 [C]. 上海: 第二届中国卫星导航学术年会电子文集, 2011.
Liu R F, Tian S W, Li G X, et al. Iridium/GPS navigation enhancement system and performance simulation [C]. Shanghai: Electronic Collection of the 2nd China Satellite Navigation Conference, 2011.
- [29] 杨波. 低轨卫星增强导航技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学(硕士学位论文), 2017.
Yang B. Research on enhanced navigation technologies based on low earth orbit satellite [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China (Master's thesis), 2017.
- [30] 卓永宁. 低轨小卫星移动通信与定位关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学(博士学位论文), 2006.
Zhuo Y N. Research on the key technologies for LEO small satellite communication and positioning [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China (Doctoral dissertation), 2006.
- [31] 常江, 田世伟, 李广侠, 等. iGPS抗干扰性能研究 [C]. 上海: 第二届中国卫星导航学术年会电子文集, 2011.
Chang J, Tian S W, Li G X, et al. Research on anti-interference performance of iGPS [C]. Shanghai: Electronic Collection of the 2nd China Satellite Navigation Conference, 2011.
- [32] 田世伟, 李广侠, 常江, 等. 基于铱星增强的GPS系统RAIM性能 [J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 14(3): 237–241.
Tian S W, Li G X, Chang J, et al. Receiver autonomous integrity monitoring in iridium-augmented GPS [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 14(3): 237–241.
- [33] Ge H B, Li B F, Ge M R, et al. Initial assessment of precise point positioning with LEO enhanced global navigation satellite systems (LeGNSS) [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 984.
- [34] 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(1): 749–764.
- [35] 方善传, 杜兰, 周培元, 等. 低轨导航增强卫星的轨道状态型星历参数设计 [J]. *测绘学报*, 2016, 45(8): 904–910.
Fang S C, Du L, Zhou P Y, et al. Orbital list ephemerides design of LEO navigation augmentation satellite [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(8): 904–910.
- [36] Xie X, Geng T, Zhao Q, et al. Design and validation of broadcast ephemeris for low earth orbit satellites [J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(2): 54.
- [37] Wang L, Chen R Z, Li D R, et al. Initial assessment of the LEO based navigation signal augmentation system from Luojia-1A satellite [J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3919.
- [38] 蒙艳松. 鸿雁星座低轨导航增强系统系统进展及展望 [C]. 北京: 第十届中国卫星导航年会, 2019.
Meng Y S. The progress and future of the Hongyan LEO navigation augmentation system [C]. Beijing: The 10th China Satellite Navigation Conference, 2019.
- [39] Wang L, Chen R Z, Xu B Z, et al. The challenges of LEO based navigation augmentation system—Lessons learned from Luojia-1A satellite [C]. Beijing: The 10th China Satellite Navigation Conference, 2019.
- [40] Rabinowitz M. A differential carrier-phase navigation system combining GPS with LEO for rapid resolution of integer cycle ambiguities [D]. Stanford: University of Stanford (Doctoral dissertation), 2001.