

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.01.007

# 基于低轨通信星座的导航增强技术发展概述

田润, 崔志颖, 张爽娜, 王盾

(航天恒星科技有限公司, 北京 100095)

**摘要:**在我国北斗三号卫星导航系统全面完成组网建设的背景下,世界卫星导航步入新时代。各卫星导航大国均瞄准更高服务精度、更加多样功能、更加可靠服务,正在着手开展新一代系统建设和技术迭代。随着各国对于大型低轨通信星座的积极开发与广泛部署,应用低轨卫星技术实现导航增强与PNT系统备份能力,因其易与GNSS协同,具有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。面向低轨导航增强技术,首先总结了低轨卫星的最新态势,梳理了卫星导航增强服务模式,并详细分析了低轨通信星座导航精度增强及导航信号增强两方面的技术动向。在此基础上,重点针对导航增强频率的兼容互操作、通信/导航信号一体化设计、高动态导航增强信号捕获与跟踪等方面,对低轨卫星导航增强体系未来的发展机遇以及面临的技术挑战进行了展望。此外,还基于美国铱星系统实收采集信号开展了定位服务性能试验分析,结果表明600个历元内收敛定位精度优于100m,相关分析成果可为我国低轨导航增强建设提供参考和借鉴。

**关键词:**低轨卫星;导航增强;精度增强;PNT系统

中图分类号:V11

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号:2095-8110(2021)01-0066-16

## Overview of Navigation Augmentation Technology Based on LEO

TIAN Run, CUI Zhi-ying, ZHANG Shuang-na, WANG Dun

(Space Star Technology Co., Ltd., Beijing 100095, China)

**Abstract:** With the completion of in-orbit construction of China's Beidou-3 satellite navigation system, the world's satellite navigation has entered a new era. Major countries in satellite navigation are aiming at providing more accurate, diversified and reliable services, and plan to upgrade technologies and build next generation of GNSS. With the active development and wide deployment of large LEO communication constellation, the application of LEO satellite technology to realize navigation augmentation and PNT system backup capability has become a research hotspot because it is easy to cooperate with GNSS system, improve global autonomous navigation accuracy and expand global satellite navigation application market. For LEO satellite navigation augmentation technology, this paper first summarizes the latest situation of LEO satellites, sorts out the satellite navigation augmentation service mode, and analyzes the technical trends of LEO communication constellation navigation accuracy augmentation and navigation signal augmentation in detail. On this basis, the future development opportunities and technical challenges of LEO satellite navigation aug-

收稿日期:2020-11-14;修订日期:2020-12-17

作者简介:田润(1989-),男,工程师,博士,主要从事卫星导航与低轨增强方面的研究。E-mail: tr1940@126.com

mentation system are prospected, focusing on the compatibility and interoperability of navigation augmentation frequency, integrated design of communication/navigation signal, acquisition and tracking of high dynamic navigation augmentation signal. In addition, this paper also analyzes the performance of LEO based positioning. Simulation results show that the positioning accuracy can achieve the accuracy better than 100m within 600 epochs, which can provide reference for the construction of LEO-NA system in China.

**Key words:** Low earth orbit satellite; Navigation augmentation; Precision augmentation; Positioning navigation and timing service

## 0 引言

从 1994 年世界上第一个全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS)——GPS(Global Positioning System)建成并提供服务开始,卫星导航技术在 26 年间已经融入社会生活的各个方面,其提供的全覆盖、全天候、全时段导航服务,在国家建设、安全和经济等领域发挥着巨大的作用。包括北斗三号在内的全球四大导航系统,在常规服务下能够提供优于 10m 的定位精度,满足了大众应用的导航定位需求。随着应用领域的逐步扩展和用户需求的不断提升,在自动驾驶、国土勘测、军事国防等领域,卫星导航信号的脆弱性逐渐显露<sup>[1-2]</sup>。首先,GNSS 采用扩频体制,导航电文速率较低,难以满足高精度产品改正数据的播发要求,限制了系统服务精度的提升;其次,GNSS 信号落地功率低,仅为 -160dBW 左右,穿透力较弱,在山区、峡谷、室内等复杂地形环境下,难以提供广域无缝的高性能位置服务;此外,卫星导航民用信号频点、结构公开,易受欺骗和干扰,在复杂电磁对抗环境下的服务性能有待提升。综上,GNSS 在特殊领域应用和复杂环境下存在可用性不足的问题,其服务精确性、可靠性和抗干扰性能都亟待增强。

近年来,低轨卫星凭借其轨道和信号的独特优势以及广泛的应用潜力,逐步受到导航增强领域的关注和青睐,并有望成为下一代卫星导航系统发展的新增量。低轨卫星既可以增强卫星导航信号,作为 GNSS 的有效提升与补充;也可以通过通信系统和导航系统融合,播发独立测距信号,形成备份的定位导航能力。目前,低轨卫星技术发展和实践方兴未艾,世界主要航天国家都积极开展了大型低轨通信星座的开发与部署。截至 2020 年 11 月 4 日,全球在轨卫星共有 6368 颗,处于工作状态的卫星共有 3408 颗,其中仅低轨卫星就超过 2000 颗,并呈现

逐年快速增长的趋势。

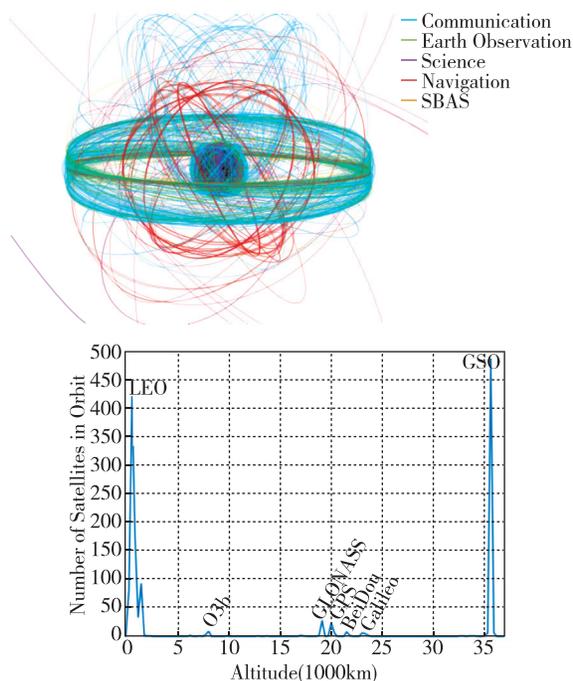


图 1 全球在轨卫星轨道及卫星轨道高度分布图

Fig. 1 Global satellite orbit and height distribution

基于上述背景,对低轨通信卫星导航增强技术的研究显得极为重要。美国下一代铱星 (Iridium NEXT) 系统于 2019 年建设完成,其提供的新型低轨卫星授时与定位 (Satellite Time and Location, STL) 服务已成为 GPS 的有效补充和备份;欧洲 Galileo 技术团队也在积极推进开普勒 (Kepler) 系统研究,由 4~6 颗低轨卫星对中高轨卫星进行监测和高精度测量,从而大幅提高 Galileo 系统的定轨精度<sup>[3]</sup>。与此同时,在国内大型央企、研究院所和民营企业的推动下,国网星座、天地一体化网络、微厘空间等低轨星座同样已开展规划建设和在轨试验。本文着眼于当前低轨卫星最新发展态势,从导航精度增强及低轨卫星信号增强等方面对卫星导航服

务提升和系统备份开展技术和能力分析,并针对卫星导航增强体系未来的发展机遇及面临的技术挑战做出了展望,为我国下一代低轨卫星系统建设提供了一定的参考和借鉴。

## 1 低轨星座最新发展态势

在经历了20世纪90年代末和21世纪初的发展低谷后,随着当今物联网、自动驾驶等导航应用需求的不断发展,低轨卫星凭借其优良信号特性及应用潜力迎来了一个崭新的发展高潮。结合全球卫星导航领域正在进行的一场深刻的技术、产业与系统变革,促进低轨卫星导航模式的创新拓展,开启了低轨卫星发展新时代。国内外相关组织及机构相继开展了低轨卫星系统的规划和建设工作,本文对于现阶段国内外低轨卫星的最新发展动态进行了调研和总结,如表1和表2所示。

目前,美国在低轨卫星领域完成抢滩登陆,已

经率先部署了数千颗低轨卫星。其中,传统低轨星座 Iridium、Orbcomm 和 Globalstar 已实现在轨运营,其中最具代表性的为 Iridium NEXT 星座(图2(a))提供的 STL 服务,可以为地球任意位置的用户提供次级精度的定位、导航和授时(Positioning, Navigation, and Timing, PNT)服务,已经被美国国防部纳入到国家战略 PNT 体系中,在 GPS 受到影响和干扰的情况下提供备份导航。新兴低轨星座以 SpaceX 商业运载公司的星链计划(Starlink)(图2(b))进展最为迅速,截至2020年11月25日,SpaceX 已完成16批共计近1000颗星链卫星的发射任务,预计在2021年3月之前实现第一阶段的550km轨道卫星部署(72个轨道面,每个轨道面22颗卫星),并开始提供全球服务。由此可见,美国整个低轨卫星系统指标及规划都较为明晰,后继卫星星座建设正朝着多功能综合、全球物联网方向有条不紊地发展,低轨卫星在导航领域的部署及升级指日可待。

表1 国外低轨星座一览

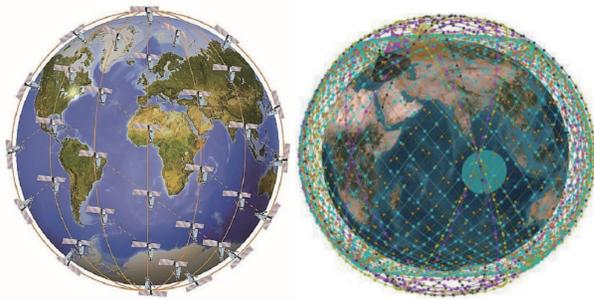
Tab. 1 List of foreign low-orbit constellations

名称	星数	制造商	推出时间	业务启动时间	轨道高度	频段	星间链路	现状
铱星	66颗+9颗备份	泰雷斯·阿莱尼亚和轨道 ATK	2009	2018	780km	L (1~2GHz) Ka (26.5~40GHz)	23GHz	已建成; 提供 STL 服务
ORBCOMM	36~48颗	Orbital Sciences 和 Teleglobe 公司	1996	1997	825km	接收:148~149.9MHz 发射:137~138MHz; 400.05~400.15MHz	无	35颗在轨; 非实时窄带通信服务
Globalstar	48颗+6颗备份	劳拉空间通信公司、高通公司	1995	1996	1414km	用户链路 L/S; 馈电链路 C/X	无	32颗在轨; 窄带通信
OneWeb	1980颗	一网与空客联合企业	2015	2019	1200km	Ka(20/30GHz) Ku(11/14GHz)	无	74颗在轨; 2020年3月申请破产,星座继续运营
Starlink	1.2万+3万	SpaceX	2014	2020	1110~1300km; 335~345km	Ku (12~18GHz) Ka (26.5~40GHz)	光通信	发射900颗(20.10.25); 99美元/月,150Mbit/s
Boeing	2956颗	波音	2016	批准后6年	1200km	V(40~75GHz)	无	暂未发星; 先进通信、高速互联网
LeoSat	78~108颗	泰雷斯·阿莱尼亚	2015	2022	1400km	Ka (26.5~40GHz)	激光通信	2019年停止运作
三星	4600颗	三星	2015	2028	1400~1500km	V (40~75GHz)	22.55~190GHz	方案设计; 高速互联网
Sphere	638颗	俄航天集团	2018	未知	未知	未知	未知	方案设计; 通导遥融合/互联网
TelesatLEO	298颗	空客和劳拉	2016	2021	1000~1248km	Ka (26.5~40GHz)	光通信	2018年发射实验星; 宽带通信/互联网

表 2 国内低轨星座一览

Tab. 2 List of domestic low-orbit constellations

系统名称	运营商	精度	频段	星座	功能	现状
鸿雁	航天科技集团	动态分米级 静态厘米级	L 波段 上行:1668~1675; 下行:1518~1525	一期移动通信星座: 数量:72;高度:1175/1120km; 倾角:86.5° 二期宽带通信星座: 300 余颗补网卫星	信号增强; 信息增强	2018 年 12 月重庆号实 验星发射成功
虹云	航天科工集团	厘米级	Ka 波段 1164~1215MHz	卫星数量:156;轨道面:13; 高度:1040km;倾角:80°	信息增强; 宽带互联网; 通导遥一体化	2018 年首发实验星; 计划于 2022—2023 年建成
微厘空间	北京未来导航 科技有限公司	动态分米级 静态厘米级	L/S	卫星数量:120;轨道面:12; 高度:975km;倾角:55°	信号增强; 信息增强	2018.09 发射一号实验星; 2020.07 S2 星发射失败
天启星座	北京国电高科 科技有限公司	全球 0.5h 内 时间重访	未知	38 颗卫星	窄带通信; 全球物联网	2020.11 实现九星组网; 向全球提供数据通信服务
珞珈一号	武汉大学	厘米级	L1/L5	卫星数量:4	信号增强; 信号增强	2018 年首发; 低轨导航增强



(a) Iridium

(b) Starlink

图 2 Iridium 和 Starlink 星座图

Fig. 2 Iridium and Starlink constellations

由于我国商业航天发展进程晚于美国,国内低轨卫星星座建设大多还处于试验星或规划论证阶段<sup>[4-5]</sup>。尽管如此,传统航天系统及商业航天领域正在积极开展自主研发卫星星群布局工作,具有代表性的包括国网融合星、鸿雁星座(航天科技)(图 3)、虹云星座(航天科工)、微厘空间(未来导航)和珞珈一号(武汉大学)(图 4)<sup>[6]</sup>等,这些星座均计划从事导航增强备份业务,辅助提升 GNSS 星座在复杂环境下的可用性及可靠性。

珞珈一号和鸿雁星座通过已发射的试验卫星获得大量实测数据,并对低轨卫星导航增强性能提升情况进行了评估,试验结果如图 5 所示。其中珞珈一号通过搭载专用的导航增强载荷播发增强信号,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均取得了突破。

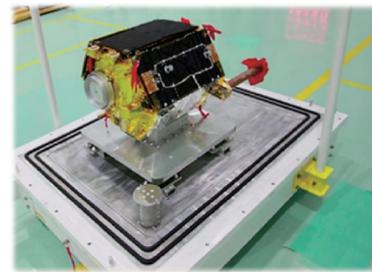


图 3 鸿雁星座首发星

Fig. 3 The first satellite of HongYan system

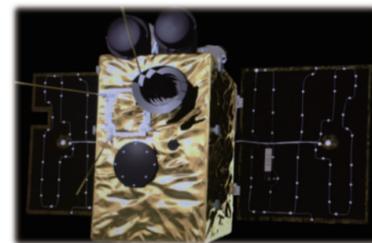
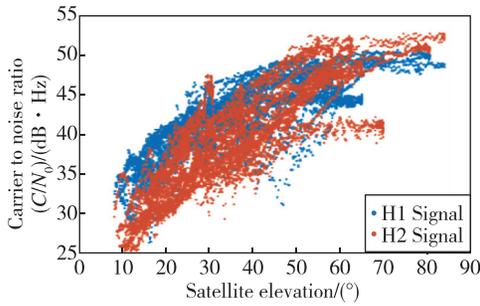


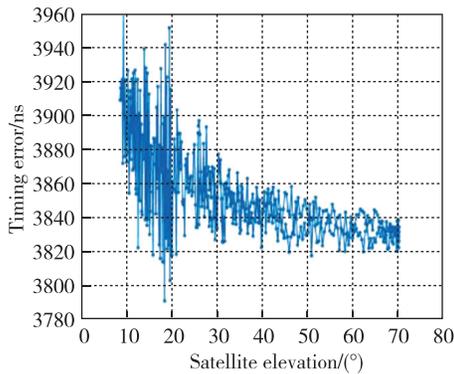
图 4 珞珈一号科学实验卫星

Fig. 4 Luojia-1 scientific experiment satellite

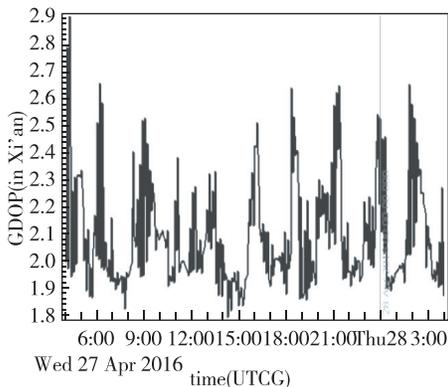
用户终端根据低轨导航增强信号特性对接收处理流程进行了优化,提升了低轨卫星的捕获灵敏度和跟踪精度,并可同时捕获和跟踪 GPS、北斗导航信号以及珞珈一号导航增强信号<sup>[7-8]</sup>。根据实测结果,珞珈一号单星授时获得的地面时钟与直接利用 GPS 信号获得的地面时钟的差异保持在 10~30ns 量级。



(a) 珞珈一号 01 星实收信号载噪比



(b) 珞珈一号 01 星授时精度



(c) 鸿雁北斗混合星座 GDOP 分布

图 5 国内低轨卫星在轨实测结果

Fig. 5 In-orbit measurement results of domestic LEO satellites

鸿雁星座的首发星于 2018 年 12 月底发射升空并开展导航增强相关试验<sup>[9]</sup>, 基于鸿雁首发星的导航增强系统能够为用户提供信息增强与信号增强服务。其中, 信息增强服务通过广播的形式播发轨道和钟差改正信息, 实现了动态分米级和静态厘米级的全球精密单点定位 (Global Precise Point Positioning, GPPP) 服务, 用户位置解算收敛时间从 30min 左右缩短到 1min 以内。同时, 信号增强服务

利用鸿雁低轨卫星作为导航信号源, 播发类似于 GNSS 卫星的测距信号, 用户同时接收 GNSS 信号与低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 信号进行联合定位解算。根据实测结果, 鸿雁与北斗混合星座在 1 天内的平均几何精度因子 (Geometric Dilution of Precision, GDOP) 相对于单北斗星座下降了 9.9%, 能够有效提升导航系统的可用性和定位精度。

国内低轨卫星在完成少量实验星验证的同时, 后续大量发射任务正在紧锣密鼓的部署中<sup>[10]</sup>。鉴于此, 现阶段基于低轨卫星导航增强系统的研究分析显现出尤为重要的实用价值和意义, 我国有望借助后发优势, 充分挖掘低轨导航系统背后的空间资源和战略价值, 把握低轨系统新增量, 实现卫星导航领域的超越。

## 2 低轨导航增强服务模式分析

卫星导航增强技术最早于 20 世纪 90 年代为应对美国 GPS 选择可用性 (Selective Availability, SA) 政策而产生。学者们提出了一种测站间差分处理的技术, 通过消除测站间公共测量误差将 GPS 的 C/A 测距码恢复到系统设计精度<sup>[11-13]</sup>。进入 21 世纪, 随着 SA 政策的取消, 导航增强技术的内涵也得到了进一步扩展, 泛指用于提升卫星导航系统服务能力的各种技术方案。

随着以 Starlink 计划为代表的低轨星座成为全球争夺空间战略资源的新战场, 卫星导航增强的发展方向同样向低轨领域逐渐倾斜, 正成为下一代卫星导航新的增长点和赋能点。现有卫星导航增强系统的服务模式如图 6 所示, 主要分为信息型增强系统和信号型增强系统两大类。

低轨导航信息增强服务通过地面监测站计算高精度产品误差改正数或完好性信息, 并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。该类服务模式中导航定位仍然依赖于现有的 GNSS 卫星导航信号, 仅通过低轨卫星通信链路播发增强信息, 即系统仅提供辅助和补充能力, 无法脱离 GNSS 单独提供服务。

根据播发增强信息的不同, 信息增强服务又可分为完好性增强和精度增强两种类型<sup>[14]</sup>: 1) 完好性增强服务: 主要面向民用航空行业, 低轨卫星播发完好性验证信息用于提供更高的导航完好性, 也在一定程度上提升了导航定位的精度; 2) 精度增强服

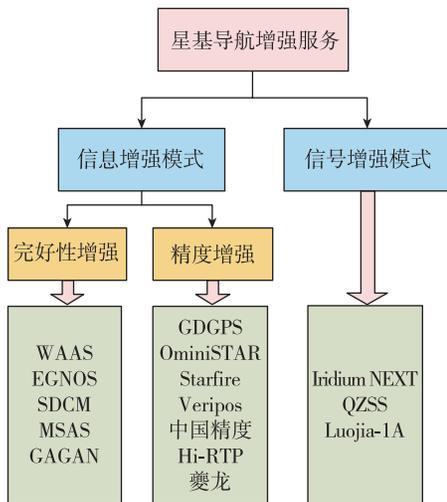


图 6 卫星导航增强服务模式

Fig. 6 Service mode of satellite navigation augmentation

务:主要播发实时的精密轨道钟差产品,以及载波相位小数偏差、区域电离层和对流层增强等信息,用于提供精密定位服务。

低轨导航信号增强服务中,利用非导航低轨卫星产生测距信号进行独立定位或与现有 GNSS 信号进行协同联合定位,提高导航信号的接收功率并改善可见卫星的星座构型,从而提升卫星导航服务的可用性、可靠性和连续性<sup>[15-16]</sup>。值得一提的是,借助伪距/多普勒联合定位算法,低轨导航信号增强服务能够为用户提供位置解算能力,即能够脱离GNSS单独提供定位服务,实现卫星导航系统

服务备份能力。典型代表为美国 Iridium NEXT 系统提供的 STL 服务。

### 2.1 低轨导航精度增强

低轨导航增强服务中最主要,同时得到最广泛的类型为低轨导航精度增强,其利用低轨卫星空间多样性为用户提供快速收敛的高精度服务。对于定位性能辅助提升的主要机理体现在,卫星导航系统测距信号中,载波相位的测距精度比伪距高几个量级。高精度的定位服务通常利用载波相位测量来实现,而相位模糊度固定是其中的关键。由于中高轨导航卫星的轨道较高,卫星运行速度慢,往往需要很多个历元的观测数据才能实现载波相位模糊度的固定。解决这一问题最简单的方法就是利用高动态的空间多样性产生偏移观测量。低轨卫星轨道低,运动速度快,能够产生较大的空间变化,使得定位过程中历元间观测方程的相关性减弱,参数的可估性大大增强,从根本上解决了载波相位模糊度参数收敛和固定慢的问题,进而实现快速精密定位。

基于低轨卫星的导航精度增强系统示意图如图 7 所示。低轨卫星播发双频精密测距信号,用户终端同时接收 GNSS 和 LEO 信号,联合 PPP 实现了快速精密单点定位。该系统能够实现水平精度优于 10cm,高程精度优于 20cm,且能够辅助 GNSS 精密单点定位收敛时间从 20~30min 降到 1min 以内。

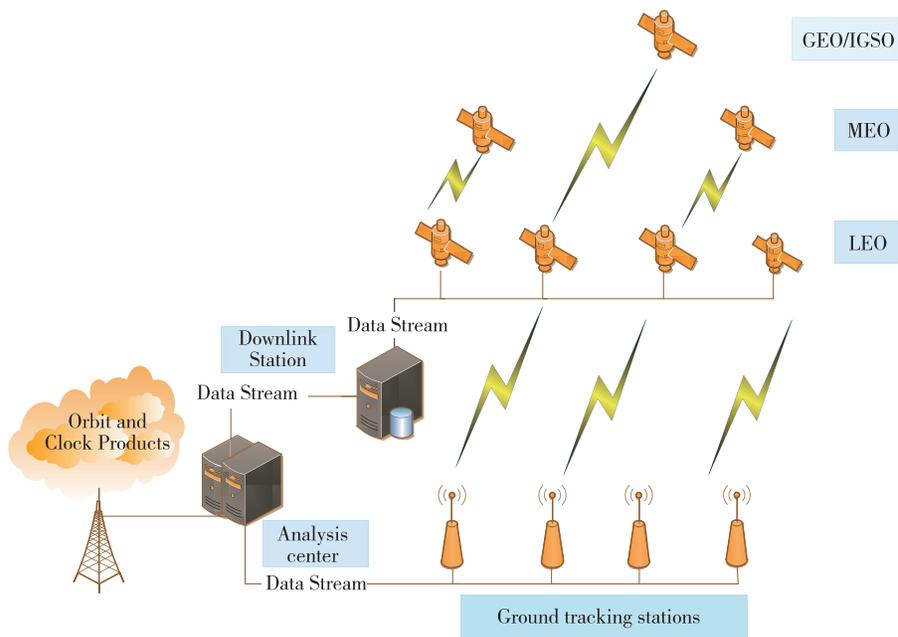


图 7 低轨导航精度增强系统

Fig. 7 Low-orbit navigation accuracy augmentation system

虽然低轨导航精度增强服务通过星基广播信道实现了大范围的信息播发,不依赖于地面基础设施建设且覆盖范围更广,但低轨导航精度增强的精密单点定位解算仍需要一定时间的收敛过程,难以达到实时高精度。因此,对部分重点服务地区可采用加密站进行区域增强的方式进行补充,确保快速精密服务的实时性和可靠性,服务性能如表3所示。

表3 低轨导航精度增强服务性能

Tab. 3 Low-orbit navigation accuracy augmentation service performance

指标项	FPPP
信号频点	H1:1521.201±3.069MHz; H2:1278.75±5.115MHz
落地电平	-153~-156dBW
定位精度	优于10cm
收敛时间	≤30s
GNSS星历误差	轨道≤5cm;钟差≤0.2ns
LEO空间信号精度	≤7.5cm
服务区域	全球,重点地区区域增强

## 2.2 低轨导航信号增强

低轨导航信号增强借助卫星平台播发伪码测距信号,解决了城市峡谷、树林、室内等阴影遮挡环境以及电磁干扰场景下的定位问题,有效扩展了卫星导航系统的服务范围和应用领域。

相较于传统的GNSS,低轨信号增强充分利用了低轨卫星的抗干扰性能,具体体现在以下几个方面:首先,低轨卫星的轨道较低,与GNSS卫星相同功率的信号在空间传递过程中的自由损耗较低,信号落地功率能够提升30dB以上;其次,LEO通信卫星本身具有较强的功率谱密度,其传输的导航增强及测距信号具备一定的抗干扰能力;最后,利用低轨卫星进行高精度、高稳定度的时间传递,缩小了终端时间不确定度,延长了相干积分时间,更容易实现导航信号的捕获与跟踪。

由于低轨卫星覆盖范围较小,传统低轨星座难以满足全球大部分区域四重以上的覆盖,因此低轨信号增强通常采用多普勒和伪距观测信息联合进行定位解算。其中多普勒观测方程可以表示为

$$f_i = f_0 \left[ 1 + \frac{\mathbf{r}_i^T \cdot \mathbf{v}_i}{c |\mathbf{r}_i|} \right] + \zeta_i$$

$$= f_0 \left[ 1 + \frac{v_{ix}(x-x_i) + v_{iy}(y-y_i) + v_{iz}(z-z_i)}{c |\mathbf{r}_i|} \right] + \zeta_i \quad (1)$$

通过多普勒测量,某时刻与卫星运动方向成 $\theta_i$ (卫星和用户接收机连线与卫星速度方向的夹角)的所有坐标点组成了一个以卫星位置为顶点、圆锥角为 $\theta_i$ 的圆锥面,该锥面称为多普勒等频圆锥面。

类似地,卫星信号的伪距观测方程可以表示为

$$\rho_n = \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_n - z)^2} + \delta t_u \quad (2)$$

基于伪距定位方程可以获得以卫星为中心的球面,将单星多历元测量或多星测量得到的球面和锥面方程联立求解方程组,即可解算出用户真实位置,定位原理示意图如图8所示。

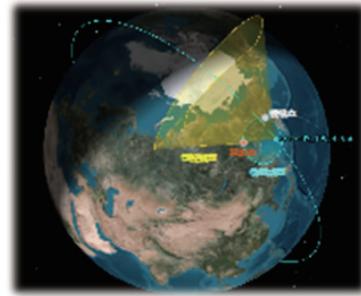


图8 伪距多普勒联合定位示意图

Fig. 8 Diagram of joint positioning by pseudo range and Doppler

## 3 铱星 STL 服务与信号性能分析

下一代铱星系统为当前唯一投入运营并提供成熟定位与授时服务的低轨卫星系统,其提供的STL服务是导航信号增强领域的一项重要突破,已成为低轨导航定位的技术标杆。本节对铱星STL信号体制及服务性能进行了深入研究,并借助实收信号采集开展了相应试验分析。

### 3.1 铱星 STL 信号体制

铱星STL信号在卫星通信体制内,利用部分时频资源,在不改变时频单元划分和信号物理层设计的基础上,增加了信号测距功能,播发低轨卫星星历,通过无线资源管理调度满足不同PNT性能要求,实现了用户终端的定位、导航与授时。

铱星信号频率范围为1616~1626.5MHz之间,总带宽为10.5MHz,其中STL信号占用后0.5MHz(1626~1626.5MHz)的单工信道播发。单工信道又划分为12个子信道,每个信道频宽为41.667kHz,包括31.50kHz的工作带宽和10.17kHz的保护间隔。系统采用频分多址(Fre-

quency Division Multiple Access, FDMA)/时分多址 (Time Division Multiple Access, TDMA) 混合用户多址方式, 每颗卫星上的 48 个点波束, 按照相邻

12 个波束使用一组频率的方式对总可用频带进行空分频率复用 (Space Division Multiple Access, SDMA)。铱星信号的混合多址结构如图 9 所示。

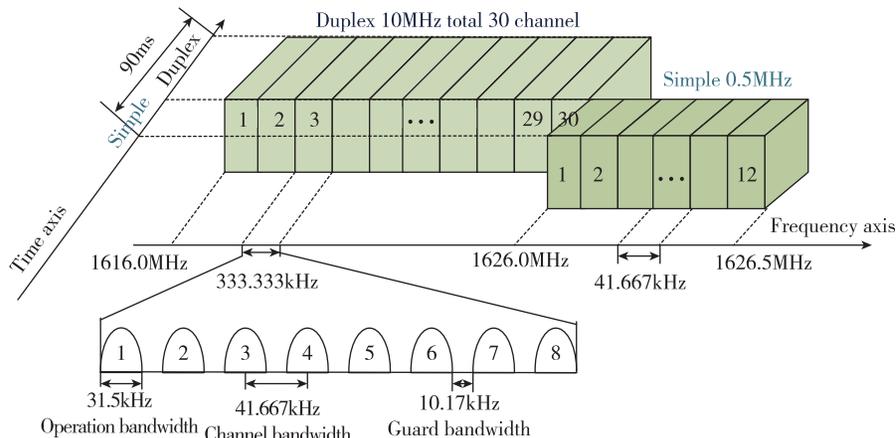
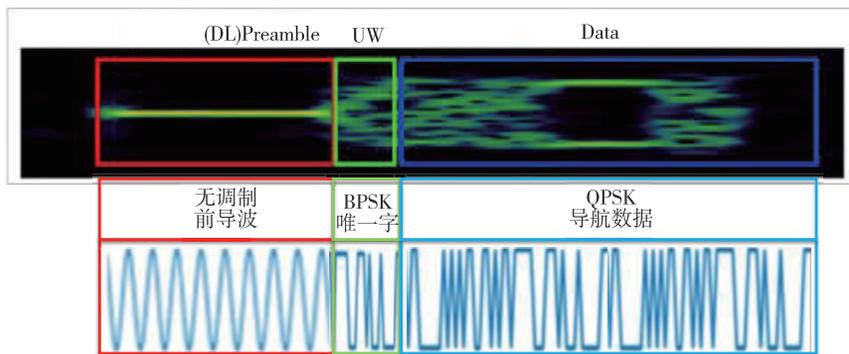


图 9 铱星系统混合多址结构

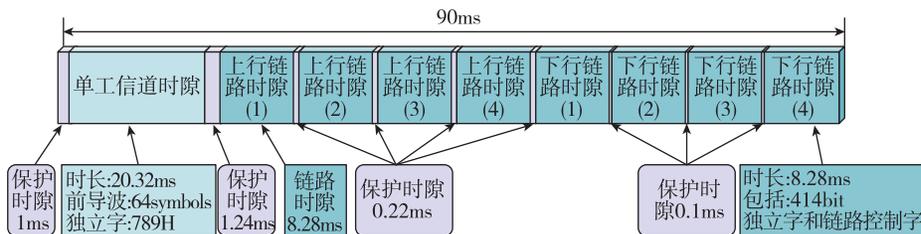
Fig. 9 Hybrid multiple access structure of Iridium system

TDMA 结构中的基本单元为时隙, 多个时隙组成一个 TDMA 帧。用户通信链路帧结构设计为每帧总时隙时长为 90ms, 整个时隙平均传输 2250 个符号, 符号速率为 25ks/s, 数据速率为 50kbit/s。每帧包括 1 个下行单工时隙和 8 个双工时隙 (4 个上

行时隙和 4 个下行时隙), 时隙与时隙之间包含保护时间间隔。其中 STL 信号为含必要导航定位信息的突发信号 (STL Burst), 通过前 20.32ms 的单工时隙播发, 具体信号结构如图 10 所示。



(a) 铱星 STL 突发信号结构



(b) 铱星 TDMA 帧结构

图 10 铱星 STL 突发信号及 TDMA 帧结构

Fig. 10 STL burst and TDMA frame structure of Iridium system

STL 突发信号由 3 个部分组成,分别为前导波(Preamble)、唯一字(Unique Word)和导航电文信息(Data)<sup>[17-20]</sup>。导航电文信息首先采用差分四相相对相移键控(Differential Quadrature Reference Phase Shift Keying, DQPSK)调制,数据率为5kbit/s,然后将经二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制后的唯一字放置在电文信息前。唯一字与数据信息组合之后,采用根升余弦滤波器进行脉冲整形,最后将 2.6ms 前导波放置在符号信息前,用于突发信号的检测与快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)频率测量。导频通道和数据通道都经过特定编码,以保证接收机能够有效恢复弱信号,提高了系统导航定位性能。突发信号中 QPSK 数据被调制在截短的伪随机序列内<sup>[21]</sup>,可以降低有效的信息传输速率,与序列相关运算关联的处理增益也增强了 STL 信号穿透建筑物和其他障碍物的能力。

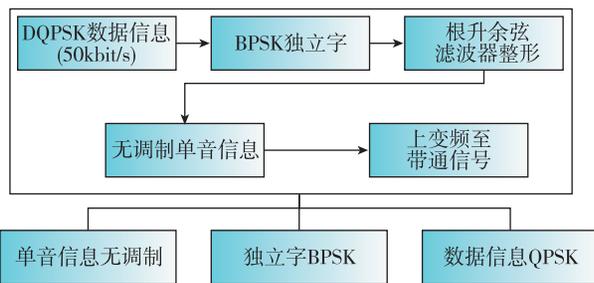


图 11 铱星系统用户链路信号结构

Fig. 11 Iridium system user link signal structure

由于采用波束轮询机制,STL 信号大约每 1.4s 播发一次。假设具备粗略的时间先验信息,接收机能够通过处理单个 burst 完成精确的授时。如果接收机能够在 0.6s 内处理一个 burst,那么用户可以在 2s 内获取精确的时间和信号频率信息。

### 3.2 STL 服务性能

Satelles 公司白皮书对 STL 的定义为:当 GNSS 表现不佳时,提供一个广泛可用的定位信号;当 GNSS 运行良好时,提供难以欺骗的时间和位置解决方案,从而验证 GNSS 定位结果<sup>[22-23]</sup>。铱星 STL 服务已经具备作为 GNSS 备份系统的能力,可以实现 GNSS 拒止条件下的导航定位服务,具体体现在如下几个方面<sup>[24-29]</sup>:

1)全球覆盖能力。铱星系统由 66 颗低轨卫星组成,能够覆盖包括极地在内的全球区域,实现了

真正意义上的全球覆盖。

2)抗干扰能力。铱星轨道高度为 780km,信号传播衰减小,STL 落地信号具有 39dB 的功率余量(衰减 39dB 仍可提供服务),可以穿透建筑物遮挡,并能够提供室内定位授时服务,室内定位精度如图 12 所示。

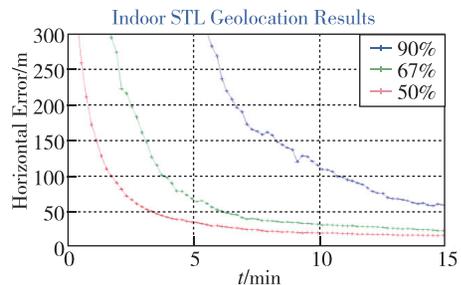


图 12 STL 室内定位精度

Fig. 12 STL indoor positioning accuracy

3)定位授时能力。STL 服务通过全球铱星地面监测站(Teleports)获取高精度世界协调时间(Universal Time Coordinated, UTC),并向铱星星座提供高精度的时间基准。目前,STL 能够提供 50m 定位精度,如图 13 所示,相对于 UTC 的授时精度能够达到 200ns。此外,Satelles 公司采用全球 25 个地面站对 GPS 时间进行比较和相互校验,能够自动检测 GPS 故障,从而提供可靠的备份授时服务。

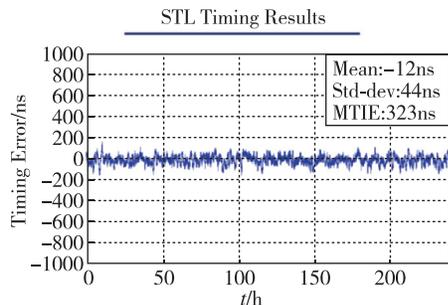


图 13 STL 授时精度

Fig. 13 Timing accuracy of STL

4)抗欺骗能力,安全性高。STL 系统采用专用加密信号,PNT 数据包都经过加密,只有付费用户才能解密使用,具有抗欺骗能力<sup>[11]</sup>,其基于位置数据的波束加密示意图如图 14 所示。

5)终端低功耗。STL 信号可由基于系统级芯片(System on Chip, SOC)的集成导航芯片产品接收处理,满足应用终端低成本低功耗的要求。用户接收模块如图 15 所示。

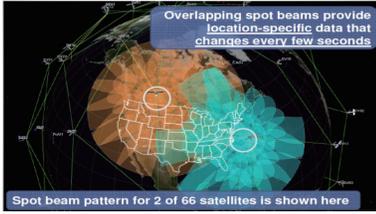
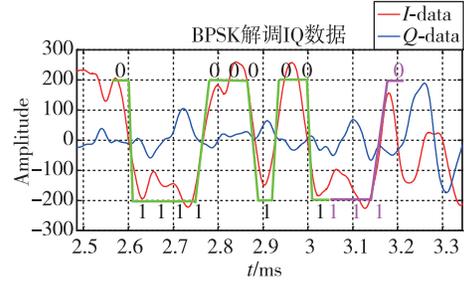


图 14 铱星信号波束加密示意图

Fig. 14 Schematic diagram of Iridium signal beam encryption



(a)唯一字 (Unique word)解调结果

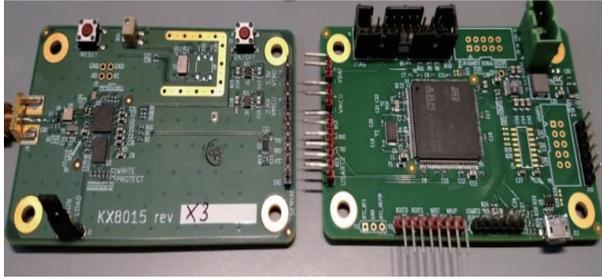
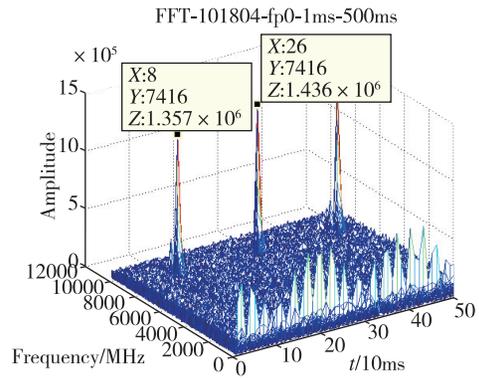


图 15 STL 用户接收模块 CSR SiRFstarV-XP

Fig. 15 STL user receiving module CSR SiRFstarV-XP



(b)STL 突发信号时频域分析图

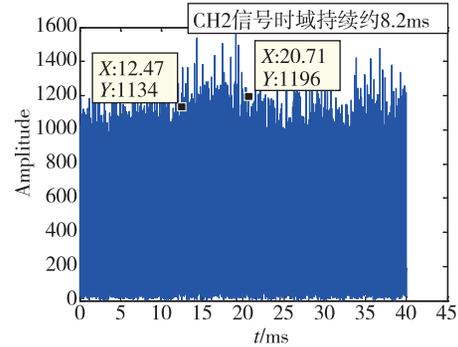


图 17 铱星 STL 突发时频分析结果

Fig. 17 Time frequency analysis of Iridium STL burst

### 3.3 STL 信号性能分析

为了进一步深入研究铱星 STL 信号体制及其导航定位性能,本文对铱星信号进行现场采集,并依据采集信号利用伪距多普勒联合定位算法开展了低轨导航定位试验分析。信号采集现场与数据接收分析场景示意图如图 16 所示。

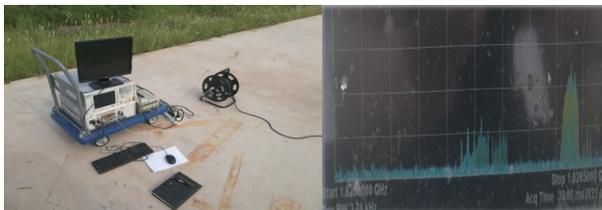


图 16 铱星信号分析数据接收场景与设备示意图

Fig. 16 Diagram of Iridium protocol analysis and the equipment

基于现场采集信号分析铱星终端主叫建立、清除和被叫过程中的信令交互,并整理终端和网络侧信令交互流程。在此基础上采用频域检测+时域复核的算法。随着 FFT 突发信号长度的增加,FFT 输出信号的特征谱线,根据判决门限即可进行信号检测,同时根据特征谱线的相对位置完成载波频率估计;此外,对捕获到的 burst 信号进行环路跟踪,从时域得到 STL 突发信号。利用信号时频域特性分析,得到时频域结果如图 17 所示。

借助现场实收采集到的铱星 STL 突发信号,本文对开阔环境下静止用户终端定位性能进行了试验评估。试验数据采集地点选取地面接收站实际位置,即北京市门头沟地区,低轨卫星轨道倾角  $86.4^\circ$ ,轨道高度 780km,图 18 展示了试验测试场景配置,其中“\*”为测站位置,曲线 1~6 为按时间排序的测站收到卫星过境时的六轨现场采集数据。假设用户先验位置误差为 10km,利用现场采集信号数据开展试验,结果如表 4 和图 19 所示,利用伪距/多普勒联合解算能够在 600 个历元内收敛定位精度达到优于 100m 的水平。

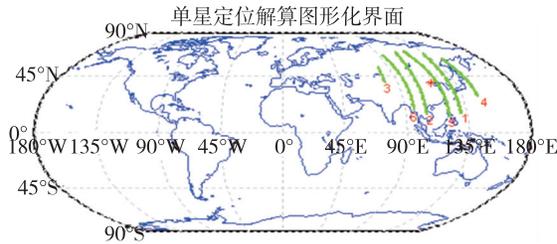


图 18 铱星 STL 服务信号采集试验场景

Fig. 18 STL signal acquisition test scenario

表 4 卫星过境数据

Tab. 4 Satellite transit data

收敛精度(35m)	
轨道号	收敛时间
轨道 1	483 历元
轨道 2	506 历元
轨道 3	/
轨道 4	/
轨道 5	564 历元
轨道 6	427 历元

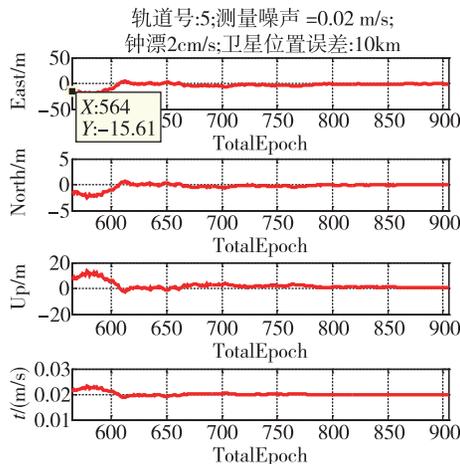


图 19 STL 采集信号定位试验结果

Fig. 19 STL positioning test results

#### 4 低轨导航增强面临的机遇与挑战

作为下一代卫星导航新的增长点和赋能点,低轨导航增强能够为卫星导航技术发展和应用推广带来新的发展机遇,同时体系架构上的差异又决定了相关技术的工程应用还面临着诸多挑战。本节针对低轨卫星导航增强体系未来的发展机遇以及面临的技术挑战进行了总结和展望。

##### 4.1 低轨导航增强带来的新机遇

与包括北斗和 GPS 在内的中高轨导航卫星相比,低轨卫星导航信号由于其独特的轨道和信号特性,将为联合定轨、空间大气监测和室内定位等方面应用带来新的发展机遇。

###### (1) 联合定轨

传统 GNSS 卫星精密定轨是利用全球均匀分布的大量地面监测站,对导航卫星进行伪距和载波相位测量,再结合精确的轨道动力学模型和误差改正模型进行数据处理,从而确定 GNSS 卫星的精密轨道。然而,我国北斗导航系统监测站建设受地缘因素影响较大,难以实现全球均匀布站。

搭载星载 GNSS 接收机的低轨卫星可以作为星基监测站,结合星间链路传输原始观测量,参与高中低轨卫星联合定轨,以弥补地面站的不足,极大增强了 GNSS 卫星跟踪网的图形强度,使轨道和动力学模型参数估计更为准确,从而实现区域监测站条件下的导航卫星精密定轨。

可以预见,随着未来低轨通信网络的建成,各类星地链路、星间链路将会带来更多的观测数据和更优的几何构型,从而进一步提升联合定轨的性能。

###### (2) 空间大气监测

低轨导航星座的加入,为大气监测提供了新的技术手段。更多的可用卫星能够提取出更加丰富的倾斜路径延迟;短时间内更多有效的观测数据,有利于实现快速的大气建模;低轨卫星轨道动态强,在单位时间内的高度角和方位角变化大,使得有效监测范围扩大。低轨星座能够为电离层建模提供极为丰富的观测资料数据,特别是可以有效填补 70% 的海洋上空没有地基 GNSS 电离层观测的资料空白;有助于提取和监测对流层梯度、电离层梯度和电离层闪烁等快变参数;多样化轨道构型的星座组合,有助于研究电离层的垂直分层结构以及更加精细化的大气建模。

###### (3) 室内定位

低轨卫星轨道较低,地面接收信号功率高,有利于改善信号受遮蔽环境下的定位性能。2018 年,运营 STL 服务的 Satelles 公司对高层建筑物室内的低轨导航服务性能开展了测试,测试场景如图 20 所示。结果表明,对于 GPS,只有在最顶层(13 楼)靠窗位置才能接收到 1~2 颗卫星的信号,其余层无法接收信号;而对于低轨卫星信号,能够穿透多层钢筋混凝土

材料的阻隔,即使在第 2 层也能获得(35~55) dB · Hz 的载噪比,相当于 GPS 在开阔环境下的信号功率水平,从而使卫星导航的室内定位服务成为可能。



图 20 低轨室内定位测试场景

Fig. 20 Test scenario of LEO indoor positioning

综上,低轨导航增强凭借其信号功率强,抗干扰、防欺骗性能好,能够增强室内等遮蔽区域服务性能,同时为联合定轨和空间天气监测等提供更多的有效数据源。通过与中高轨 GNSS 星座形成互

补,能够在未来实现对导航系统精度、完好性、连续性和可用性的全面增强。

#### 4.2 低轨导航增面临的挑战

目前,低轨导航增强作为一项新兴技术,其研究整体上仍处于发展规划和技术攻关阶段,尽管部分关键技术已取得突破,但在技术体系完善和系统建设等方面还面临着若干技术挑战。

##### (1) 频率的兼容互操作

目前,适宜导航的 L、S 频段的频率资源极度稀缺<sup>[30]</sup>,国际电联组织为卫星导航业务分配的频段资源如图 21 所示,能够开发利用的频段已非常缺乏,且申报及协调难度大。因此,在大规模低轨导航增强系统的建设过程中,必须考虑与现有卫星导航系统信号的兼容互操作,包括信号功率控制、带外抑制、杂散抑制、互调干扰、信号的收发隔离等因素,对系统的前期建设工作带来了一定的挑战。此外,有学者提出了将导航信号频率向 Ku、Ka 波段推广,确保在提供增强服务的同时,不会干扰现有卫星导航系统的正常使用。

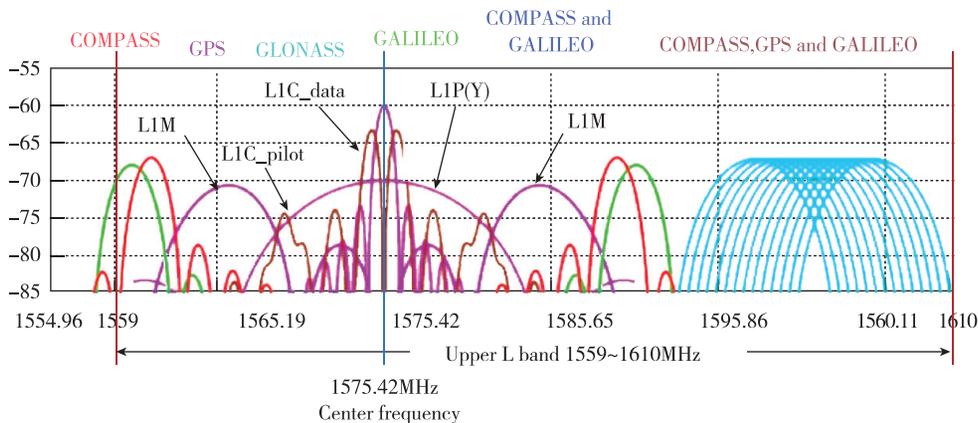


图 21 导航频段频谱资源分布图

Fig. 21 Navigation spectrum distribution

##### (2) 通信和导航信号一体化设计

导航与通信在信号层面的融合,在不新增星上时频资源需求的前提下,将导航信号融入到通信信号中进行播发,是解决导航信号频谱资源紧张和功率受限的主要手段。然而,通信业务的突发性以及通信信道的时频域非连续性与导航的宽带持续信号体制差异显著,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) 低轨星历生成及误差建模

随着以 Starlink 为代表的低轨星座蓬勃发展,未来大型低轨通信星座动辄规划了上万颗甚至数十万颗卫星的规模。对于大量低轨卫星精密轨道的测定以及巨量导航电文信息的播发,难以沿用现有的技术手段,需要开发新的技术路线。

对于低轨导航信号的误差源建模,同样不能简单套用目前 GNSS 信号的误差建模方法。与 GNSS 卫星相比,低轨卫星的导航增强载荷、轨道动态及所处空间环境存在一定差异,导致信号的软硬件延迟时变特性也有所不同。此外,低轨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,需要进行针对性的研究设计。

#### (4) 高动态导航增强信号的捕获跟踪

低轨卫星平台距离地面近、运动速度快,大大提升了卫星导航信号的多普勒频移与变化率变范围。在低轨导航信号的接收处理方面,需要针对性地考虑高动态导航信号的快速捕获问题,采取多种途径来保持并提升信号的跟踪精度。

#### (5) 其他导航增强手段的挑战

低轨导航增强面临的技术挑战除了来自于低轨卫星内部,同样来源于其他导航增强手段的竞争,主要包括地基增强系统及星基增强系统,系统服务关系如图 22 所示。

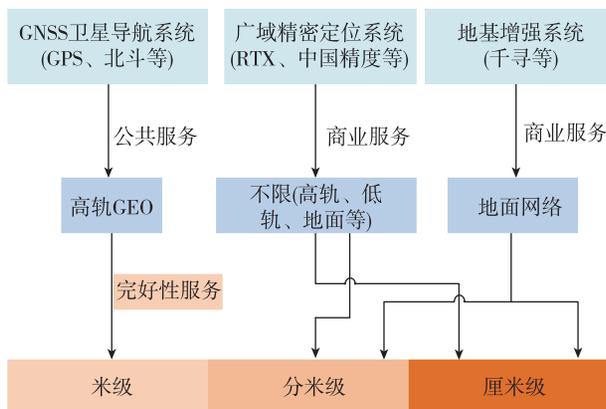


图 22 导航增强系统框图

Fig. 22 Diagram of navigation augmentation system

地基导航增强系统以北斗地基增强为代表,如图 23 所示,目前全国范围布设的北斗基准站 2000 多个,定位精度能够达到 2~4cm,服务收敛时间少于 10s,经过后处理可实现毫米级的高精度定位<sup>[31]</sup>,性能优于低轨导航精度增强系统。但地基导航增强系统需要地面基础设施覆盖,并且仅能够覆盖陆地区域,对于广阔的海洋区域相关应用无法提供有效服务。



图 23 北斗地基增强系统

Fig. 23 Beidou ground-based augmentation system

星基导航增强最具代表性的为 Trimble RTX Fast 系统,该系统全球布置 100 余站,按 150~200km 区域间隔布站,实时生成高精度 GNSS 星历和全球范围的系统误差改正数据,并能够推算出区域电离层和对流层信号传播误差改正数据,由用户终端接收 GNSS 导航信号和星基播发的误差改正数据进行 PPP 精密单点定位,定位结果如图 24 所示,收敛时间优于 1min,定位精度达到 2~4cm。

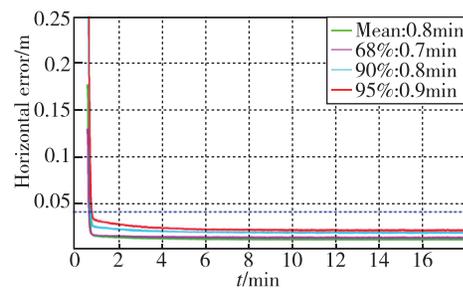


图 24 Trimble RTX-FAST 定位结果

Fig. 24 Positioning result of Trimble RTX-FAST

表 5 对低轨导航增强和其他增强手段进行了比较。可以看出,地基增强方式定位精度最高,并能提供实时高精度服务,但其覆盖范围仅有数百 km;传统 PPP 星基增强方式虽能提供全球服务,但其收敛时间高达 30min,难以满足行业应用需求;PPP-RTK 增强模式能够有效收敛定位时间,但也相应牺牲了导航增强的服务范围;低轨导航精度增强系统能够在较短收敛时间的条件下达到较高的定位精度,结合重点服务地区采用加密站进行补充,能够为全球用户提供实时、可靠、高精度的导航增强服务,已经成为未来导航增强领域最为有效的解决方案。

表 5 低轨导航精度增强与其他增强手段比较

Tab. 5 Comparison of low-orbit navigation accuracy augmentation and other augmentation methods

系统	精度	收敛时间	地面资源	空间资源	覆盖区域	应用场景 北坡效应	用户容量
低轨精度增强	水平 10cm 高程 20cm	<60s	较少全球布站 无需区域加密站	卫星数颗	全球	无	无限
地基增强 VRS	2~4cm	<10s	无需全球布站 区域加密站间隔 30~80km	无	数百 km	无	5000/单网
传统 PPP	2~4cm	<30min	全球框架站 100~	卫星数颗	全球	有	无限
星基广域 精密定位 PPP-RTK	2~4cm	<1min	全球框架站 100~ 区域加密站间隔 100~200km	卫星数颗	数千 km	有(GEO) 无(IGSO/MEO)	无限

## 5 结论

随着四大导航系统的全面建成,各卫星导航应用大国也在规划部署新一代导航系统发展,积极寻找新的能力增长点。低轨星座凭借其信号功率高、几何动态大、抗干扰能力强等优势,能够在全球范围内对 GNSS 形成信息增强和信号增强,全面提升卫星导航系统的精度、完好性、连续性和可用性,为高中低联合精密定轨、空间天气监测和室内定位等实际应用和科学研究带来新的发展机遇,但同样也面临着低轨卫星内部技术需求以及外部其他导航增强手段带来的挑战。鉴于此,本文针对我国低轨增强技术发展和系统建设提出如下建议:

1)充分利用现有资源,加强多种导航增强系统联合互补与协调规划。包括低轨增强、广域增强、地基增强在内的多种手段并非互相排斥、互为取代的关系,需处理好系统建设的统筹规划和服务上的功能错位,避免重复建设造成的资源浪费。宜充分发挥低轨的独特优势,与其他导航增强手段形成有机互补,以优化、高效、协同的路线解决多系统建设问题。

2)推进低轨卫星通信、导航、遥感功能融合,构建多功能、多层次天基信息智能服务体系。应用软件无线电技术的多功能、可重构载荷平台已经成为下一代低轨卫星的发展趋势。可以借鉴美国 Black-jack 系统的建设思路,协同发展我国的通信、导航、遥感技术,构建载荷多用、星座组网的多层次、多模式、柔性化、可配置的低轨星座,从而利用较少的低轨星座平台资源最大化协同效能,提升系统的综合服务能力。

3)保障理论研究与技术应用的同步发展,避免出现理论应用不同步的不利局面。随着近年来众

多巨型低轨星座的涌现,未来规划的低轨星座包含动辄数千甚至上万颗卫星,无论是在巨量低轨卫星的协同精确定轨、高精度时间同步与维持、新型动力学及误差模型建立等理论研究,还是在频率兼容互操作、高速低轨星历播发、高动态信号接收机设计等应用技术方面均有待突破。因此,需注重理论研究和应用技术的协同发展,充分发挥新技术、新方法的优势,切实推进低轨导航增强系统的工程化实现进程。

随着未来下一代移动通信将卫星网络技术纳入到规划路线中,空、天、地、海泛在移动通信网络的建立,使低轨导航增强最终有望走进千家万户,实现大众应用。低轨导航增强也将是我国综合 PNT 体系的重要组成部分。各种不同轨道卫星的融合,将为世界卫星导航带来新变化、新发展,而其中低轨星座因其独特优势将为世界卫星导航领域发展注入新的动力源泉。

## 参考文献

- [1] 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):1501-1505.  
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): 1501-1505(in Chinese).
- [2] Gutt G, Lawrence D, Cobb S, et al. Recent PNT improvements and test results based on low earth orbit satellites[C]// Proceedings of 49<sup>th</sup> Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. Reston, Virginia, 2017: 72-79.
- [3] 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 Yuanxi. Concepts of comprehensive PNT and related key technologies[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(5): 505-510 (in Chinese).
- [4] Fan S, Zhao L, Xiao W, et al. Performance analysis and simulation of iridium navigation satellite based on STK[C]// *Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications*. IEEE, 2012.
- [5] 杨元喜. 弹性 PNT 基本框架[J]. *测绘学报*, 2018, 47(7): 893-898.  
Yang Yuanxi. Resilient PNT concept frame[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(7): 893-898(in Chinese).
- [6] 郭树人, 蔡洪亮, 孟铁男, 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 Shuren, Cai Hongliang, Meng Yinan, et al. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(7): 810-821(in Chinese).
- [7] Lawrence D, Cobb S, Gutt G, et al. Test results from a LEO-satellite-based assured time and location solution [C]// *Proceedings of 2016 International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, 2016: 125-129.
- [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 Ruizhi, Wang Lei, Li Deren, 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(in Chinese).
- [9] Shi C, Zheng F, Lou Y, et al. National BDS augmentation service system (NBASS) of China: progress and assessment [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(8): 1-16.
- [10] 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 Shuren, Liu Cheng, Gao Weiguang, et al. Construction and development of satellite navigation augmentation systems[J]. *GNSS World of China*, 2019, 44(2): 1-12(in Chinese).
- [11] 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 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(in Chinese).
- [12] 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 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(in Chinese).
- [13] 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
- [14] 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 Siqing, Zhang Ding. Comparison analysis of satellite-based augmentation system “China CM” and CORS[J]. *Geospatial Information*, 2016, 14(5): 1-4 (in Chinese).
- [15] 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*, 2018, 61(1): 73-93.
- [16] Gutt G, Lawrence D, Cobb S, et al. Recent PNT improvements and test results based on low earth orbit satellites[C]// *Proceedings of 49<sup>th</sup> Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting*, 2018: 72-79.
- [17] Jiang W, Li Y, Rizos C. Locata-based precise point positioning for kinematic maritime applications[J]. *GPS Solutions*, 2014, 19(1): 117-128.
- [18] 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.
- [19] 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 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(in Chinese).
- [20] Tan Z, Qin H, Cong L, et al. New method for positioning using IRIDIUM satellite signals of opportunity [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 83412-83423.

- [21] 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.
- [22] 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 Honglei, Tan Zizhong, Cong Li, et al. Positioning technology based on IRIDIUM signals of opportunity[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019, 45(9): 1691-1699 (in Chinese).
- [23] Reid T, Neish A, Walter T, et al. Leveraging commercial broadband LEO constellations for navigation [C]// *Proceedings of 29<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016)*. Portland, 2016.
- [24] 杨波. 低轨卫星增强导航技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.  
Yang Bo. Research on enhanced navigation technologies based on low earth orbit satellite[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017(in Chinese).
- [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] Li X, Ma F, Li X, et al. LEO constellation-augmented multi-GNSS for rapid PPP convergence [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(1): 749-764.
- [27] 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.
- [28] Wang L, Chen R, Xu B, et al. The challenges of LEO based navigation augmentation system—lessons learned from Luojia-1A satellite[C]// *Proceedings of 10<sup>th</sup> China Satellite Navigation Conference*. Beijing, 2019.
- [29] 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 Shanchuan, Du Lan, Zhou Peiyuan, et al. Orbital list ephemerides design of LEO navigation augmentation satellite [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(8): 904-910(in Chinese).
- [30] Wang L, Chen R, Li D, et al. Initial assessment of the LEO based navigation signal augmentation system from Luojia-1A satellite [J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3919.
- [31] 蒙艳松. 鸿雁星座低轨导航增强系统系统进展及展望[C]// *第十届中国卫星导航年会*. 北京, 2019.  
Meng Yansong. The progress and future of the Hongyan LEO navigation augmentation system[C]// *Proceedings of 10<sup>th</sup> China Satellite Navigation Conference*. Beijing, 2019(in Chinese).
- [32] 王磊, 李德仁, 陈锐志, 等. 低轨卫星导航增强技术—机遇与挑战[J]. *中国工程科学*, 2020, 22(2): 144-152.  
Wang Lei, Li Deren, Chen Ruizhi, et al. Low earth orbiter (LEO) navigation augmentation: opportunities and challenges [J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(2): 144-152(in Chinese).

(编辑:李瑾)