



研究与开发

低轨星座通导一体化：现状、机遇和挑战

赵亚飞, 闫冰, 孙耀华, 彭木根

(北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 随着毫米波、高通量卫星通信等技术日渐成熟, 及其对全球宽带通信服务的迫切需求, 低轨巨型通信星座建设受到极大关注, 高达数千颗卫星的低轨通信星座被部署, 大量部署的低轨通信卫星实现了高频射频信号对地面的多重覆盖, 同时地面通信资源为信号接收提供了硬件平台, 为通信导航一体化的发展创造了条件。讨论了低轨通导一体化星座的现状、机遇和挑战, 重点阐述了低轨通导一体化星座与全球卫星导航系统所需资源的差异, 按照空间段、地面段和用户段分别进行了阐述, 最后给出了结论和对未来研究的展望。

关键词: 通导一体化; 低轨星座; 导航定位; 星座设计; 轨道确定

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023087

Communication and navigation integration for LEO constellations: status, opportunities, and challenges

ZHAO Yafei, YAN Bing, SUN Yaohua, PENG Mugen

State Key Laboratory of Networking and Switching Technology,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: With the growing maturity of millimeter wave technology and high-throughput satellite communication technology, as well as the urgent need for global broadband communication services, the construction of LEO giant communication constellation has attracted great attention, and up to thousands of satellites have been deployed. A large number of LEO communication satellites have realized multiple and repeated coverage of high-frequency radio frequency signals on the ground. At the same time, ground communication resources provide a hardware platform for signal reception and create conditions for the development of integrated communication and navigation. The status quo, opportunities and challenges of the integrated LEO navigation constellation were discussed, and the differences of resources required by the integrated LEO navigation constellation and the global navigation satellite system were emphatically expounded. In terms of space segment, ground segment and user segment, the conclusions and prospects for future research were presented.

Key words: communication and navigation integration, LEO constellation, navigation and positioning, constellation design, orbit determination

收稿日期: 2022-02-10; 修回日期: 2023-04-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2021YFB2900200); 北京市科技计划项目 (No.Z221100007722012)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2021YFB2900200), The Beijing Science and Technology Project (No.Z221100007722012)

0 引言

近年来,随着低地球轨道(low earth orbit, LEO)(简称低轨)业务的不断兴起和受重视程度的不断提高,低轨巨型星座得到极大的发展,涌现大批低轨通信星座,如星链(Starlink)^[1]、一网(OneWeb)^[2]、柯伊伯(Kuiper)^[3],以及我国正在建设的低轨通信星座等。在此背景下,探索基于低轨巨型通信星座的多重覆盖特性,利用低轨星座提供的通信信号、时频信息,以及卫星平台、地面站和终端等资源,在低轨通信星座上拓展导航、定位与授时功能,是当前研究的热点问题。

低轨卫星通信与导航一体化近年来得到越来越广泛的研究。铱星(Iridium)公司较早开展相关研究,卫星时间和位置(satellites time and location, STL)技术是Satelles公司、波音公司和Iridium合作开发的一种低轨卫星导航技术^[4]。STL通过铱星卫星星座发射的定位信号能够穿透包括深室在内的许多遮蔽环境。2016年STL系统发布,

STL系统基于铱星这一低轨通信卫星系统,可以提供独立的定位导航服务与授时服务。STL系统示意图如图1所示,STL系统主要用于以下3个方面:(1)独立的定位授时服务;(2)辅助全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)信号捕获;(3)在不能观测到足够数量的GNSS卫星时辅助GNSS定位。此外,相较于民用全球定位系统(global positioning system, GPS)完全公开、容易欺骗的缺点,STL系统具有抗欺骗能力,可以完成更为安全的定位授时服务。铱星系统是一个卫星通信系统,STL系统与之相结合为通信系统与导航定位系统的融合提供了一个成功的范例。

据报道,2022年12月,欧洲航天局(European Space Agency, ESA)拟投资3.51亿欧元用于导航领域的项目,并将重点关注其中名为“未来导航”(FutureNAV)的专项计划。低轨导航概念示意图如图2所示,该项任务利用低轨卫星特有的优势和附加能力的结合,以及低轨卫星发射容

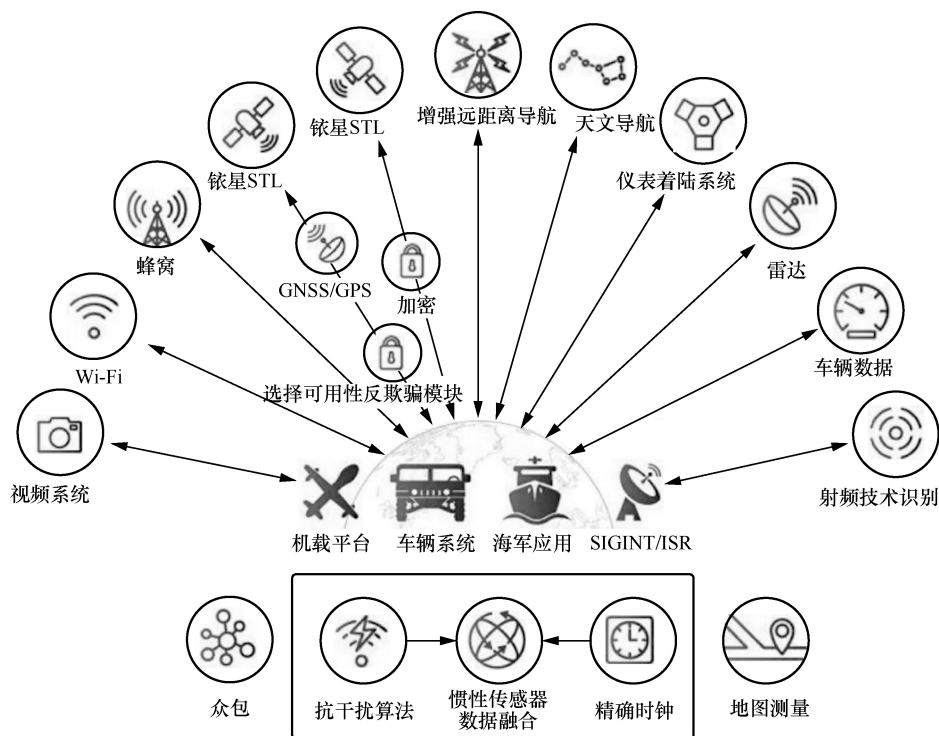


图1 STL系统示意图



易快速部署的特性, 提供更快动态性、更低的信号损耗能力、更低的时延等, 最终可以对 GNSS 的韧性和鲁棒性提供能力补充和备份。最终将由大约 12 颗卫星组成的低轨星座进行在轨演示, 实现包括定位导航授时 (positioning navigation and timing, PNT) 体系有效载荷、小型卫星平台、卫星发射、地面控制系统、运行系统、测试用户终端、技术和服务端到端的演示任务, 最终将提供更快更准的定位信息, 并通过实现双向链路服务提高整体信号的可用性。该项任务涉及 GNSS、广域和局域 PNT 服务、系统和技术、LEO 卫星、小型卫星、空间等相关技术。

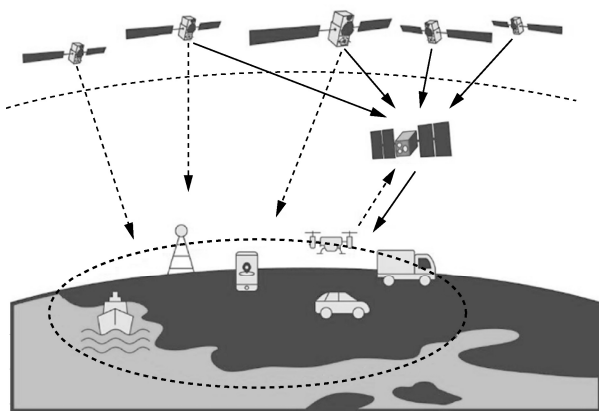


图2 低轨导航概念示意图

未来 10 年, 人们将见证一场空间技术革命, 数万颗用于宽带通信的低轨卫星将发射升空。利用低轨通信卫星进行导航和授时成为近年来的研究热点。这种通导一体化要求定制宽带协议以支持导航功能, 另一些研究建议以机会信号的方式利用现有的宽带 LEO 星座进行导航^[5-7]。前者可以使用相对简单的接收机和导航算法, 但需要对现有基础设施进行较大改变, 而后者无须改变基础设施, 但在导航精度方面明显不如前者。

总的来看, 基于低轨通信卫星实现导航功能, 主要有以下几种方式。

(1) 基于机会信号的导航定位

该方法是将低轨卫星的通信信号作为一种机

会信号, 通过在接收端测量到达角、信号强度或多普勒频移等信息, 实现导航定位的一种方式。由于这种机会信号不是特定的定位信号, 在信号获取后没有解码, 因此这种方法的定位精度不高, 通常需要联合其他测量设备提升定位精度^[8-9]。

(2) 基于 GNSS 信号的导航增强

在低轨卫星上部署导航增强载荷接收 GNSS 信号, 实现 GNSS 信号在其他频段转播, 以支持用户定位。同时, 可以通过信息增强或信号增强的方式, 实现用户定位性能提升^[10]。

(3) 基于专用星载载荷的独立导航

针对低轨通信星座的多重覆盖特性, 在星座设计和卫星平台设计时考虑通导一体化, 进行优化设计, 以实现终端的通信与导航等目的。

本文从低轨星座通导一体化可用的资源出发, 分析低轨通导一体化系统框架, 重点阐述低轨星座通导一体化的可用资源分析、信号设计, 以及面临的机遇和挑战。

1 低轨卫星通导一体化框架

低轨通信卫星融合导航功能具有巨大优势, 低轨卫星轨道高度较低, 一般在几百千米到 2 000 km, 其发射信号空间损耗较小。以铱星系统为例, 其地面接收机接收的信号强度比 GPS 强大约 30 dB (1 000 倍)。因此, 将 LEO 卫星用于导航定位可以拓宽服务范围与场景, 使在一些阴影遮蔽环境中的定位导航成为可能^[11]。其次, 由于 LEO 卫星相对于中地球轨道 (medium earth orbit, MEO) 等轨道更高的卫星运动速度更快, 在相同的观测时间内几何位置变化较大, 在载波相位定位时更有利于对整周模糊度进行解算^[12]。与此同时, LEO 卫星相对于地面接收机的速度非常快, 具有很好的多普勒观测性, 利用这一点可以单独使用 LEO 卫星进行多普勒定位, 在 GNSS 不可用时可以作为补充的定位系统, 减少定位导航系统的使用限制^[13]。最后, 低轨卫星目前常用于通信遥测等应用, 其信息传输速率往往

较高,低轨宽带卫星的速率甚至可达几百兆比特每秒,远远高于 GNSS 导航电文传输速率。

此外,低轨通信卫星的优势还包括数量和多重覆盖,与 GNSS 相比,其在卫星几何精度因子 (geometric dilution of precision, GDOP) 方面提供 3 倍改进。这允许放宽空间信号用户测距误差 (signal in space user ranging error, SIS URE), 同时仍然匹配 GPS 的位置精度。LEO 的辐射环境更温和,使商用现货 (commercial off-the-shelf, COTS) 组件设计的导航有效载荷成为可能。目前,很多低轨卫星采用高频宽带体制,这也带来了抗多径优势^[14-15]。

低轨星座通导一体化框架如图 3 所示,低轨卫星通信导航一体化的基本框架由 3 个部分组成:空间段、地面段和用户段。空间段用于搭载通导一体化应用的载荷及在轨资源,地面段实现对在轨资源的管理、监控和修正,用户段实现与卫星之间的通信,接收导航信息并实现定位解算。

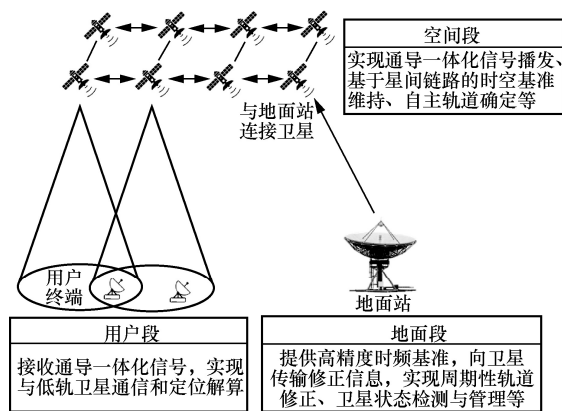


图3 低轨星座通导一体化框架

1.1 空间段

空间段涉及的要素包括低轨星座、卫星平台、星上载荷等,需要对空间段的资源进行重新考虑,基于低轨卫星的可用功耗、成本等因素,进行通导一体化设计。

1.1.1 星座设计

低轨星座由部署在不同轨道平面上的多颗卫星组成,针对通导一体化设计,需要通过对地覆盖以完成共同应用所需的覆盖范围。低轨星座达

到独立导航能力时,需要 4 重以上的连续覆盖,考虑覆盖性、路径损失、大气阻力等因素,500~1 000 km 的高度是 LEO 卫星部署的合理区域^[16]。

除了覆盖性,星座设计的另一个重要因素就是拓扑选择,其主要目标是最大化效率,同时最小化总体系统成本。在当前的低轨星座中,对地导航定位目前已经在一些星座进行了探索和尝试,包括 Globalstar、Orbcomm、铱星和铱星 NEXT 等,这些低轨星座设计之初是建立通信星座,之后又兼顾了导航功能。兼顾导航功能的低轨通信星座见表 1。

在现有导航星座中, Walker 星座性因其对称构型和良好的全球覆盖能力,被广泛应用于导航星座中。此外,覆盖带设计方法考虑将卫星置于同一高度的倾斜圆形轨道上,选择若干不同平面实现局部或全球覆盖^[17]。此外, Flower 星座也可实现区域或全球覆盖,这取决于具体的任务要求^[18]。低轨星座有上百颗甚至上千颗卫星,根据不同的任务要求、卫星数量和覆盖特性,低轨星座设计已成为一个非线性的多目标优化问题,各种优化算法也开始应用于低轨星座设计,如遗传算法应用于星座设计^[19],然而,遗传算法的结果与权重高度相关,需要合理地选择权重。综合考虑对地覆盖性、对称性和星座管理等方面,低轨通导一体化星座的首选仍然是 Walker 星座。

1.1.2 星载设备

高精度时间基准是高精度导航定位的基本前提,因此,时钟设备是面向通导一体化应用的核心载荷。低轨卫星导航依靠稳定的时钟定义时空参考系。受限于低轨卫星体积、功耗、成本等因素,目前低轨卫星普遍将部署高稳晶体振荡器作为低轨卫星时频基准构建的基础,通过接收 GNSS 的周期性信号进行时频修正。低轨卫星难以像 GNSS 那样配置氢原子钟、微型铷原子钟等高精度原子钟设备,如果时钟时间不够稳定,或者频率漂移性能较差,将导致伪距测量误差累积显著,难以获取较高的导航精度。



表 1 兼顾导航功能的低轨通信星座

星座名称	在轨卫星数量/颗	轨道高度/km	业务类型
Globalstar	48	1 414	语音、数据
Orbcomm	50	825	物联网 (Internet of things, IoT)、机器到机器通信 (machine-to-machine, M2M)
Iridium	66	780	语音、数据
Iridium NEXT	66	780	语音、数据

随着光学和微机电系统发展,具有低功率、小体积的原子钟近年来得到了快速发展,低功率、小体积的原子钟示例如图 4 所示,包括微型铷原子钟和芯片级原子钟 (chip-scale atomic clock, CSAC)。2022 年 6 月,地月自主定位系统技术操作和导航实验 (cislunar autonomous positioning system technology operations and navigation experiment, CAPSTONE) 立方星发射,测试美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 阿尔忒弥斯登月任务的新轨道^[20-21],此次立方星任务还将测试 NASA 两项新技术,这两项技术可以帮助未来的月球探测器更自主地确定自身在太空中的位置。其中一项是芯片级原子钟,另一项是由先进空间公司开发的导航软件。这也是芯片级原子钟在低成本、小卫星平台上的初次尝试和应用。

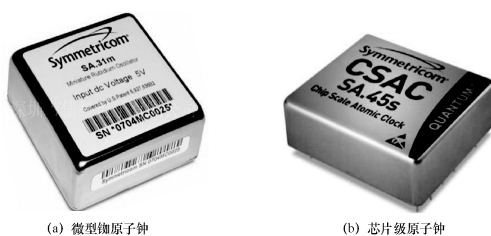


图 4 低功率、小体积的原子钟示例

稳定原子钟的另一个解决方案是采用异构时钟系统,并利用低轨卫星上的 GNSS 接收机,通过接收 GNSS 时频信号,建立稳定的时间基准。在这方面, Van 等^[22]设计了一种使用单晶振荡器、一个或多个芯片级原子钟和星载 GPS 接收机的架构。异构时钟系统如图 5 所示,这种异构的振荡器组被组合在一起,以约束晶体振荡器,

并获得从不到 1 s 到几天的时间范围内的整体系统稳定性。

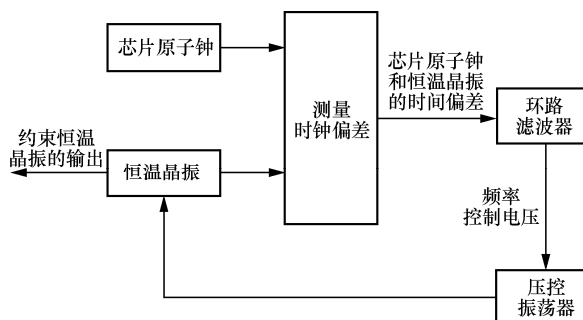


图 5 异构时钟系统

除了自然存在的噪声和不稳定性,卫星时钟还会经历相对论的频率漂移。因为卫星上的时钟频率与地面上的时钟不同,星上时钟要比地面上的时钟移动速度快很多,而且它们受到的引力要小很多。在精确 GNSS 定位中,也需要考虑这种相对论效应的存在。

1.2 地面段

地面部分负责低轨卫星系统的日常管理与系统维护等任务,具体包括卫星精确定轨、星历表计算、时钟修正估计以及卫星电文定期更新等内容,本节重点对低轨卫星通导一体化系统与 GNSS 的区别进行论述。

1.2.1 布站选择

在 GNSS 中,地面部分由位于全球战略位置的地面站组成,用于跟踪、监视以及与卫星系统通信。综合考虑几何精度稀释 (GDOP)、载噪比、雨衰、连接中断概率 (LOP) 因素,确定最佳建站位置。

由于低轨卫星的固有增益,通导一体化星座

在考虑布站时，将主要围绕几何构型、信噪比、成本、覆盖性等指标进行优化选择，除采用通信卫星信关站外，也可以在地面增加锚固站。目前仍没有统一的建模和优化方案。

考虑最佳布站位置时常用的指标见表 2，主要包括 GDOP、载噪比、雨衰、LOP，在这些优化指标下，开展地面站切换策略和布站数量及位置确定。

表 2 考虑最佳布站位置时常用的指标

优化指标	指标说明	文献
几何精度因子稀释	包含经度、纬度、高程和时间精度衰减因子 4 个参数，是导航性能指标的重要参数	[23-24]
载噪比	载波和载波噪声关系的标准测量尺度，反映射频信号质量	[25-26]
雨衰	评价信号受雨水天气的影响	[27-28]
连接中断概率 (LOP)	表征地面站数量与可用性对连接的影响	[29]

1.2.2 精密轨道确定与星历表

(1) 精密轨道确定

传统的近地轨道卫星定轨基于地面站和多普勒轨道学与无线电定位集成卫星 (Doppler orbitography and radio-positioning integrated by satellite, DORIS) 接收机实现，安装在卫星上的 DORIS 天线指向地球，接收来自地面站的无线电信号。通过多普勒效应引起的频移确定地面站与低轨卫星之间的距离。此外，卫星激光测距 (satellite laser ranging, SLR) 技术也是实现精确定轨的一项关键技术，通过地面站在光谱范围内连续发射激光脉冲，低轨卫星反射激光脉冲，通过往返时间测量确定星地距离，从而实现卫星精密轨道确定，这种方式的定轨精度高，但实现起来比较复杂。

此外，部分低轨卫星采用在地面处理中心下载 GNSS 测量数据和辅助数据后，离线执行精确的定轨解决方案。这种时延取决于下行过程所需的时间以及生成精确 GNSS 轨道和时钟产品所需的时间。

对于依赖星载 GNSS 接收机的近地轨道导航系统，这种下行传输和 GNSS 产品生成的时延会给实时定位用户带来繁重负担，因此必须根据卫星任务的具体应用选择近地轨道定位技术。

对于通导一体化系统而言，低轨卫星轨道确定也可以通过卫星上安装星载 GNSS 接收机实现定轨，但是由于这种动态解中的几米级或十几米级精度，对于低轨卫星精确定轨来说存在不足，实现导航功能时难以提高导航精度。一种可行的方案是采用更加精确的 GNSS 产品、载波相位测量或双频测量数据，从而提升定轨精度。另一种有效的高精度解决方案是基于混合系统利用 GNSS 数据和非 GNSS 数据，结合这两种数据的优点，但在一定程度上会增加时延。

(2) 星历表

广播星历表模型主要是为 GNSS 导航卫星开发的，而低轨通导一体化系统可以使用基于开普勒轨道元素的星历表模型^[30]，把星历信息嵌入系统信号中播发给用户。但与 GNSS 不同，由于低轨卫星轨道高度更小，其所处环境中的空间作用力也更加复杂，如重力、大气阻力、电离层等影响。传统的广播星历表模型无法描述这些复杂的轨道动力学，或描述起来更为复杂，尤其在近地轨道偏心率接近 0 时，以开普勒根数描述的动力学模型会出现奇异。例如，部分学者给出了一种广播模型，该模型考虑在某些情况下，由于近地轨道的偏心率较小，开普勒元素是奇异的。该方法使用 22 个开普勒参数获得了最佳结果，而传统消息中只有 16 个^[31]。

目前，适用于低轨卫星通导一体化系统的星历表形式还在探索中，尽管广播星历表是导航系统中最传统的计算卫星轨道的方法，但仍然不排除低轨卫星系统采用其他方式的可能，GNSS 卫星发布精确轨道坐标的时间分辨率为 15 min，相比之下，低轨卫星向用户发布精确轨道坐标的最佳时间步长尚没有明确结论。



(3) 空间环境效应

低轨卫星通导一体化面临的空间环境效应包括电离层效应、对流层效应、相位缠绕效应等。

电离层效应是由于太阳辐射的紫外线照射地球大气层,大气层中的气体分子离子化,带电粒子的数量大到足以在射频信号的几个波段上引起折射,从而影响电波的传播的一种现象。当卫星射频信号通过电离层传播时,其由于折射效应而弯曲,接收机跟踪信号的时间更长。这种时延通常被称为电离层时延。在电离层模型上,目前GNSS上都有比较完备的电离层模型,如用于GPS的Klobuchar模型^[32]、伽利略的NeQuick^[33]和北斗全球广播电离层时延修正模型^[34]。此外,国际GNSS服务(International GNSS Service, IGS)组织还提供了全球电离层地图(global ionospheric map, GIM)^[35],其精度为1~2 m。二维GIM提供的电离层时延从地面一直计算到GNSS卫星的工作高度,约为20 000 km,并不能直接应用于低轨卫星导航系统,专门用于低轨卫星的电离层模型对于单频导航来说是必要的。在对精度要求更高时,可以采用多频导航方式,通过多个频率之间的相位时延分析,实现消除电离层的绝大多数影响,将精度提升到亚米级。

对流层效应是卫星信号传播到地球上受到对流层非弥散性介质的影响,在对流层中,不同频率的电磁波具有相同的传播速度,利用双频接收机消除电离层时延的方法不再适用。低轨道卫星发射的信号将出现对流层时延,对流层时延的变化取决于温度、大气压力、湿度和水蒸气。这种时延还取决于接收机的地理位置以及卫星相对于接收机的仰角。

相位缠绕效应是指卫星天线与接收天线之间的相对运动导致的载波相位变化。由于圆极化波的电磁特性,发射端或接收端的天线旋转会引起相位变化。当低轨卫星播发信号时,由于低轨卫星轨道角速度较高,发射天线所在面旋转速度更快,这种效应更加明显,但目前尚没有发现关于

低轨卫星旋转引起的相位缠绕效应的讨论。

1.3 用户段

用户段由接收低轨卫星信号、处理测量并解算的射频接收器和天线组成,目前的通信导航融合终端一般需要高度计^[36]、惯导^[37]等辅助,通过测量多普勒漂移^[38]、伪距率^[39-40]、载波相位^[39]、到达角^[40]等信息,实现导航定位。通导一体化用户终端在通信终端基础上增加导航解算能力,解码信号中的星历表信息。目前全球还没有专门的通导一体化用户终端,但已经有公司开始了这方面的尝试,例如,Xona空间系统公司^[41]为专门的低轨导航用户接收机提供了指导实例,该公司从自动驾驶汽车的高可靠性领域出发,开发了一种名为Xona Pulsar的低轨导航服务。通导一体化终端由于是专门为通信、导航功能设计的,因此也具有更高的导航定位性能。

2 展望

未来,低轨卫星通导一体化还需要在以下方面进行进一步的突破和研究。

2.1 低轨卫星自主定轨

低轨卫星目前的两种主要定轨方式为地面测控或者星载GNSS接收机,这两种方式可为低轨卫星定轨实现较高的精度。然而,低轨卫星应用于导航定位时,尤其是面对低轨巨型星座的情形,卫星数量多,依靠地面测控工作量大且复杂,如何高效、精确、快速地实现定轨,从而构建高精度星历,还需要进一步探索自主高精度轨道确定的新方式。

针对通导一体化星座,可以利用地面锚固站以及通信卫星信关站,其作为坐标已知的“伪卫星”与其他卫星完成星间双向精密测量和时间同步,利用其先验坐标使通导一体化星座和地球建立联系。此外,还可以通过空间观测,形成高精度的修正模型,利用低轨卫星轨道周期短的特点,在过顶时进行周期性的模型修正,从而提升卫星的定轨精度。

2.2 低轨卫星高精度时频基准

低轨卫星受限于体积、功耗、成本等因素,难以配置像 GNSS 系统一样的原子钟,通常高稳晶振,难以维持长时间的频率稳定度。近年来,芯片原子钟的发展为低轨卫星的高精度时频基准建立提供了一条可行途径,基于多源时频信号资源,如何实现星地同步、星间同步,或者低轨和高轨同步等,都是需要进一步探讨的问题。

综合考虑低轨卫星成本、寿命和性能,时频基准的建立可以采用小型化原子钟的方案,如微型铷原子钟、芯片原子钟等低成本方式实现,同时低轨卫星过境时,还可以接收地面的标准时频信息,通过星上综合信号处理模块进行综合处理,形成星历信息,并播发给用户,通导一体化星座时频基准如图 6 所示。

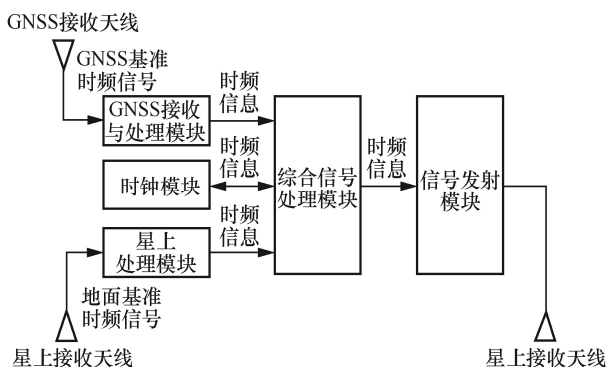


图 6 通导一体化星座时频基准

2.3 通导一体信号设计

解决通导一体化的另一个核心问题是信号体制设计,如载波频段、调制方式、电文、测距码、扩频码以及信号评估等,这与传统的通信和导航信号均不相同,是一种新型信号体制,要进行系统性设计。

在载波频段方面,大多数低轨星座运行在 Ku 波段和 Ka 波段,部分星座则倾向于使用更高频率(如 Q 波段/V 波段)。在频段选择上,一方面要考虑系统间干扰,另一方面要考虑高频带来的路径损耗。在调制方式上,相位调制,如二

进制相移键控(binary phase shift keying, BPSK)、正交相移键控(quadrature phase shift keying, QPSK)和连续相位调制(continuous phase modulated, CPM),通常测量时延方面效果更好,可以获得更好的定位精度;如果采用多普勒测量手段,可以采用频率调制,如多级频移键控(multiple-frequency shift keying, MFSK)、高斯最小频移键控(Gaussian minimum shift keying, GMSK),这种方式对多普勒误差具有更强的鲁棒性。采用 BPSK 调制时,在低信噪比情况下,卷积码的解码时延和复杂度较低,而在中等和高信噪比情况下,并行级联卷积码(Turbo)编码性能最好。在波束成形方面,为了保证服务质量和为尽可能多的用户/设备提供服务,可以考虑在 LEO 卫星和用户设备上采用大规模多输入多输出(massive multiple-input multiple-output, mMIMO)技术,采用多天线阵列结构使基于波束的多路复用和定位成为可能。

2.4 低轨通导一体化星座管理

低轨星座要达到和 GNSS 系统一样的覆盖效果,需要的卫星数量达到数百颗,如此规模的星座如何进行管理,包括地面测定轨管理、星历参数修正、时频同步等,都需要系统性的管理措施。

针对通导一体化星座的地面运行管理维护系统,可采用平台即服务(platform as a service, PaaS)层,主要由管理层、数据层和网络层组成。管理层主要面向用户和低轨卫星任务,完成测控资源调度、链路管理、通导一体化星座信息化管理。网络层主要面向测控通信网络体系,根据职能细分,充分发挥各专网优势的同时,将地面时钟、地面站等资源组成资源共享、高效合理的数据公网,提高资源使用效能,避免资源的重复建设,有效降低管控网络的运营成本。数据层主要面向数据存储,通过虚拟化技术,将物理底层的资源以服务的方式提供给用户。



3 结束语

本文针对低轨星座通导一体化问题,首先给出了低轨星座通导一体化框架,从空间段、地面段和用户段 3 个方面阐述了低轨星座通导一体化的内涵。空间段方面,综合考量了低轨星座以及星载设备对通导一体化的影响,低轨通导一体化星座的首选星座仍然是 Walker 星座,星载时频设备可采用原子钟与 GNSS 系统组合的异构时钟系统;地面段方面,本文讨论了基于 GDOP、载噪比、雨衰、LOP 因素影响的布站数量及位置确定,讨论了利用 GNSS 数据和非 GNSS 数据的精密轨道确定问题;用户段方面,对通导一体化用户终端进行了初步探讨。针对通导一体化未来的发展方向和技术展望,本文从自主定轨、时频基准、信号设计、星座管理 4 个方面进行了阐述,期望对我国的低轨星座建设有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] NEINAVAIE M, SHADRAM Z, KOZHAYA S, et al. First results of differential Doppler positioning with unknown Starlink satellite signals[C]//Proceedings of 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-14.
- [2] 晓春. OneWeb 太空互联网低轨星座的新进展[J]. 卫星应用, 2016(6): 75-77.
XIAO C. New progress in LEO constellation of OneWeb space Internet[J]. Satellite Application, 2016(6): 75-77.
- [3] MARKOVITZ O, SEGAL M. Advanced routing algorithms for low orbit satellite constellations[C]//Proceedings of ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [4] PERDUE L, FISCHER J, DRIES R. Signals of opportunity as an augmentation or alternative to GNSS for critical timing applications[J]. GPS World, 2017, 28(3): 49-49.
- [5] JARDAK N, JAULT Q. The potential of LEO satellite-based opportunistic navigation for high dynamic applications[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2022, 22(7): 2541.
- [6] 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.
- [7] MAAREF M, KHALIFE J, KASSAS Z. Integrity monitoring of LTE signals of opportunity-based navigation for autonomous ground vehicles[J]. GPS World, 2018, 29(10): 49-49.
- [8] NEINAVAIE M, KHALIFE J, KASSAS Z M. Acquisition, Doppler tracking, and positioning with starlink LEO satellites: first results[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(3): 2606-2610.
- [9] KHALIFE J, NEINAVAIE M, KASSAS Z M. The first carrier phase tracking and positioning results with starlink LEO satellite signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(2): 1487-1491.
- [10] 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 L, LI D R, CHEN R Z, et al. Low earth-orbiter (LEO) navigation augmentation: opportunities and challenges[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(2): 144-152.
- [11] 张小红, 马福建. 低轨导航增强 GNSS 发展综述[J]. 测绘学报, 2019, 48(9): 1073-1087.
ZHANG X H, MA F J. Review on the development of low orbit navigation enhanced GNSS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(9): 1073-1087.
- [12] GE H B, LI B F, NIE L, et al. LEO constellation optimization for LEO enhanced global navigation satellite system (LeGNSS)[J]. Advances in Space Research, 2020, 66(3): 520-532.
- [13] MORTLOCK T, KASSAS Z M. Assessing machine learning for LEO satellite orbit determination in simultaneous tracking and navigation[C]//Proceedings of 2021 IEEE Aerospace Conference (50100). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-8.
- [14] MICHALAK G, GLASER S, NEUMAYER K. Precise orbit and earth parameter determination supported by LEO satellites, inter-satellite links and synchronized clocks of a future GNSS[J]. Advances in Space Research, 2021, 68(12): 4753-4782.
- [15] SU Y T, LIU Y Q, ZHOU Y Q, et al. Broadband LEO satellite communications: architectures and key technologies[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(2): 55-61.
- [16] PROL F S, FERRE R M, SALEEM Z, et al. Position, navigation, and timing (PNT) through low earth orbit (LEO) satellites: a survey on current status, challenges, and opportunities[J]. IEEE Access, 2022(10): 83971-84002.
- [17] 龚宇鹏, 张世杰. 偶数重连续覆盖的 Walker 星座设计方法[J]. 宇航学报, 2022, 43(9): 1163-1175.
GONG Y P, ZHANG S J. Design method of Walker constellation with even multiple continuous coverage[J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(9): 1163-1175.

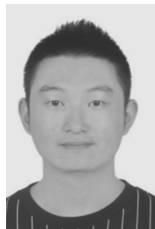
- [18] 徐哲宇, 杜兰, 刘泽军, 等. 基于 Flower 星座的区域导航增强低轨卫星星座设计与优化[C]//第十一届中国卫星导航年会论文集——S07 卫星导航增强技术. [出版地不详:出版机构不详], 2020: 116-120.
XU Z Y, DU L, LIU Z J, et al. Design and optimization of LEO satellite Constellation for Regional navigation Enhancement based on Flower Constellation [C]// Proceedings of the 11th Annual China Satellite Navigation Conference. [S. l. : s. n.], 2020: 116-120.
- [19] 水浩然, 陈勇, 陈宏新. 基于遗传算法的寻优解卫星星座优化设计策略[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(5): 45-53.
SHUI H R, CHEN Y, CHEN H X. Optimal design strategy of satellite constellation based on genetic algorithm[J]. Navigation Positioning and Timing, 2021, 8(5): 45-53.
- [20] CHEETHAM B. Cislunar autonomous positioning system technology operations and navigation experiment (CAPSTONE)[C]//Proceedings of ASCEND2020. Reston: AIAA, 2020: 4140.
- [21] THOMAS S, BRAD C, ALEC F, et al. CAPSTONE: acubesat pathfinder for the lunar gateway ecosystem[C]//Small Satellite Conference, [S. l. : s. n.], 2021.
- [22] VAN BUREN D, AXELRAD P, PALO S. Design of a high-stability heterogeneous clock system for small satellites in LEO[J]. GPS Solutions, 2021, 25(3): 1-14.
- [23] MENG Y S, BIAN L, HAN L, et al. A global navigation augmentation system based on LEO communication constellation[C]//Proceedings of 2018 European Navigation Conference (ENC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 65-71.
- [24] BL A, HGA B, MG B, 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.
- [25] CASSEL R S, SCHERER D R, WILBURNE D R, et al. Impact of improved oscillator stability on LEO-based satellite navigation[C]//Proceedings of the 2022 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. [S. l. : s. n.], 2022: 893-905.
- [26] MONTENBRUCK O, GARCIA-FERNANDEZ M, WILLIAMS J. Performance comparison of semicodeless GPS receivers for LEO satellites[J]. GPS Solutions, 2006, 10(4): 249-261.
- [27] MA F J, ZHANG X H, HU J H, et al. Frequency design of LEO-based navigation augmentation signals for dual-band ionospheric-free ambiguity resolution[J]. GPS Solutions, 2022, 26(2): 53.
- [28] IANNUCCI P A, HUMPHREYS T E. Fused low-earth-orbit GNSS[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022(99): 1.
- [29] WANG M Y, LIU G L, MA R F, et al. A novel navigation-communication integrated waveform for LEO network[C]//Proceedings of GLOBECOM 2022-2022 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2023: 747-752.
- [30] PETER M, OLIVER M, UWE H. Performance evaluation of the early CNAV navigation message[J]. Navigation Journal of the Institute of Navigation, 2016, 62(3): 219-228.
- [31] HAUSCHILD A, MONTENBRUCK O. Precise real-time navigation of LEO satellites using GNSS broadcast ephemerides[J]. NAVIGATION, 2021(68): 419-432.
- [32] XIE X, GENG T, ZHAO Q L, et al. Design and validation of broadcast ephemeris for low earth orbit satellites[J]. GPS Solutions, 2018, 22(2): 54.
- [33] GUO X L, WANG L, FU W J, et al. An optimal design of the broadcast ephemeris for LEO navigation augmentation systems[J]. Geo-Spatial Information Science, 2022, 25(1): 34-46.
- [34] YUAN Y B, WANG N B, LI Z S, et al. The BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model (BDGIM) and its preliminary performance evaluation results[J]. Navigation, 2019, 66(1): 55-69.
- [35] HERNÁNDEZ-PAJARES M, JUAN J M, SANZ J, et al. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(3): 263-275.
- [36] KHALIFE J J, KASSAS Z M. Receiver design for Doppler positioning with LEO satellites[C]//Proceedings of ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Piscataway: IEEE Press, 2019: 5506-5510.
- [37] KASSAS Z, MORALES J, KHALIFE J. New-age satellite-based navigation-STAN: simultaneous tracking and navigation with LEO satellite signals[J]. Inside GNSS Magazine, 2019, 14(4): 56-65.
- [38] TAN ZZ, QIN H L, CONG L, et al. Positioning using Iridium satellite signals of opportunity in weak signal environment[J]. Electronics, 2019, 9(37): 1-18.
- [39] FARHANGIAN F, LANDRY J R. Multi-constellation software-defined receiver for Doppler positioning with LEO satellites[J]. Sensors, 2020, 20(5866): 1-17.
- [40] THOMPSON S, MARTIN S, BEVLY D. Single differenced Doppler positioning with low earth orbit signals of opportunity and angle of arrival estimation[C]//Proceedings of the 2021 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, The International Technical Meeting of the The Institute of Navigation. [S. l.:s. n.], 2021: 497-509.
- [41] REID T G R, CHANB, GOEL A, et al. Satellite navigation for the age of autonomy[C]//Proceedings of 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 342-352.



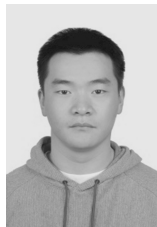
[作者简介]



赵亚飞（1987—），男，博士，北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室副研究员，主要研究方向为低轨卫星通信导航一体化。



孙耀华（1992—），男，博士，北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室副教授，主要研究方向为低轨卫星通信和无线接入网络智能化。



闫冰（1999—），男，北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室硕士生，主要研究方向为低轨星座时频基准建立与维护。



彭木根（1978—），男，博士，北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室教授，主要研究方向为空间信息通信、通感算一体化、雾无线接入网络等。