

科技新闻

·深度报道·

从南京到霍尔木兹： 低轨卫星如何补齐导航安全短板

文/陈舒怡¹, 孟维晓²

2025年12月17日傍晚,南京部分区域突现导航定位异常。许多人的第一反应是地图坏了,或是网络断了。但随后的技术分析表明,问题的根源并非地图数据,而是全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)民用信号在局部区域遭到临时干扰压制。

几个月后,霍尔木兹海峡及邻近海域传出更为危险的警报:当地全球定位系统(Global Positioning System, GPS)等GNSS信号以及船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)遭遇干扰、欺骗与压制,船位跳变、虚假航迹、异常航速同时出现。

一个发生在城市出行场景,一个出现在全球能源要道——2起事件看似无关,却将同一个问题推至公众面前:当卫星导航突然失灵,现代社会赖以运转的时空底座,其实比想象中更加脆弱。

正是在这样的现实压力下,低轨卫星通信与导航一体化开始从产业热词演变为安全议题。第

三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)在Release 17版本中,首次将非地面网络(Non-Terrestrial Networks, NTN)纳入第5代移动通信(5G)规范体系,明确支持低轨卫星接入及天地网络间的业务连续性。欧洲航天局(European Space Agency, ESA)的Celeste任务,正在验证由11颗卫星构成的低轨定位、导航与授时(Positioning, Navigation and Timing, PNT)演示星座。美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)对基于66颗铱星的卫星时间与位置服务(Satellite Time and Location, STL)测试表明,低轨不仅具备补充定位的能力,更可在区域GPS中断条件下提供可用的授时与定位服务。

低轨星座,不再只是天上的宽带基础设施,它正在被重新定义为下一代时空基础设施的关键一层。

1 当地图还在,位置却消失了

人们日常所说的“导航”,往往只联想到开车、打车、点外卖时的路线规划。但在工程意义上,

PNT从来不只是导航软件的一项功能,而是一种隐形的基础设施。欧盟联合研究中心(Joint Research Centre, JRC)指出,PNT服务早已渗透至电网、金融、移动通信等关键系统。导航只是公众最常感知的表层,其背后统一的时空基准才是真正的核心。正因如此,一次GNSS中断的后果,往往会沿着基础设施链条层层放大。

南京导航定位异常事件之所以令人印象深刻,恰恰在于它把这种脆弱性从专业领域拉回到了日常生活。人们突然发现,道路明明就在眼前,手机却把自己定位到了湖里、桥下,或是一片毫无数据的空白区域。霍尔木兹海峡的通报则把同一个问题放大到了全球贸易的尺度:在高风险海域,位置一旦不可信,受影响的就不仅是一艘船,而是航运安全、港口调度乃至整条能源供应链。城市与海峡,看似相距甚远,实则暴露了同一种系统弱点——对弱卫星信号的单点依赖。

2 为什么偏偏是低轨

要理解低轨卫星轨道(low earth orbit, LEO)为何重新进入视野,还需从传统GNSS的物理特性说起。来自中轨道的导航信号需跨越2万km量级才能到达地面,落地时功率已极其微弱,一旦遭遇遮挡、干扰或欺骗,便极易失真。ESA的判断十分明确:低轨PNT由于轨道更低、运动更快,并可引入新信号与新频段,能够提供更强的接收信号、更高的精度、可用性与鲁棒性,尤其适合城市峡谷等遮挡环境(图1);同时,LEO卫星更

1. 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 副教授,《科技导报》青年编委
2. 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 教授

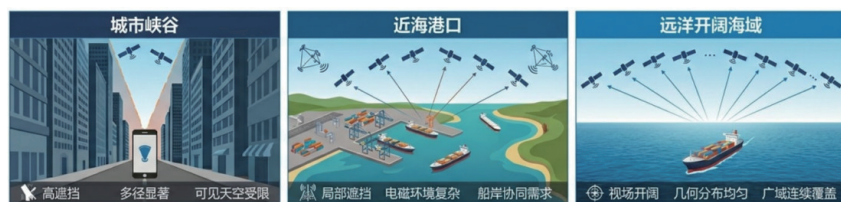


图1 典型城市峡谷、近海港口和远洋海域场景LEO多星可见性

快的几何变化也有利于高精度定位。更重要的是,ESA正探索比传统L波段更具抗干扰能力的频段及更宽带的信号体制——这意味着LEO的优势不仅在于离地更近,更在于体制层面的重新设计。

通导一体化的意义,也不只是将导航功能附着在通信星座之上。3GPP已将非地面网络(NTN)纳入5G标准框架,强调天地网络间的业务连续性;ESA则进一步提出基于5G兼容波形的双向导航服务设想。换言之,通信正在为导航带来传统GNSS所不具备的返回链路、网络协同与业务连续性,而导航也在为通信提供统一的时空基准、测距能力与完整性支撑。当天上的星座既能传输数据,又能发送时间、提供距离、进行校核,它便不再仅是通信系统叠加导航功能,而是在向时空网络演进。

3 规模本身就是能力

在LEO通导体系中,规模已不仅是成本问题,更是性能问题。单颗或少数几颗低轨卫星只能验证概念,真正要将服务打造为可信赖的基础设施,必须拥有足够多的卫星同时在轨可见。原因并不复杂:LEO单星覆盖范围小、可见时间短、运动速度快,只有星座规模上来之后,用户侧才能获得更丰富的几何构型、更快的重访

速度、更高的冗余度以及更强的局部抗干扰能力。

JRC也指出,当前全球技术路线大致分为2类:一类是利用现有宽带LEO星座实现融合式PNT,另一类是建设专用低轨PNT基础设施。而ESA的Celeste项目与NIST验证的STL服务均表明,一旦多层星座网络成形,LEO便能在传统GNSS之外提供真正具备价值的韧性增量。这里的关键不在于有没有卫星,而在于是否有足够多的卫星。

当规模上来之后,LEO通导一体化的价值将开始显现网络效应。通信链路可下发辅助信息、认证数据与完整性告警,导航链路则反过来为通信提供更稳定的时间同步与位置支撑。在ESA设想的多类应用中,遇险车辆可在没有地面网络的情况下直接通过卫星上传位置并发送低速率安全

消息,低功耗物联网终端也可借助LEO获得更可靠的定位能力。这意味着,大规模星座带来的已不再是单纯的定位增强,而是连接能力与时空能力的同步跃升。

4 它改写的,不只是定位

如果LEO通导一体化真正落地,最先受益的,必然是那些最怕GNSS失真的场景:城市高楼林立的街区、港口桥吊密集的码头、近海复杂电磁环境下的无人系统、灾后地面网络受损的应急通信现场——这些场景(图2)都需要更强、更密、更可协同的时空服务。

ESA对低轨PNT的设想,已经不再停留在传统车载导航,而是直接面向自动驾驶、海事、铁路、航空、公共安全和大规模物联网。也就是说,未来的竞争,不只是看谁能把误差再缩小几米,而是看谁能在复杂环境中把定位、连接和安全性同时做稳。

但比定位更深的一层,其实是时间。JRC明确指出,电网、金融服务和移动网络都高度依赖稳定授时;NIST对STL的公开测试则显示,典型接收机相对于美国



图2 低轨卫星通导一体化典型应用场景示意

国家标准与技术研究院协调世界时,可实现平均约 10 ns 的时间偏差、最大偏差小于 200 ns,并且这种 LEO 服务对区域 GPS 中断具有韧性。对通信系统而言,这一点尤为关键——一旦授时源更稳,基站同步、网络切换、关键基础设施联动的底层逻辑都将随之改变。换句话说,LEO 通导一体化真正可能改写的,不只是用户手机上的蓝点,而是整个数字社会的节拍器。

5 走向通导一体化,还要翻过哪些山

首先,最容易被忽视的一点是,许多低轨 PNT 方案并非在真空中凭空生成导航能力。JRC 的研究指出,多层低轨 PNT 架构往往仍依赖星上 GNSS 接收机来完成轨道确定和时间同步,核心目标甚至要求达到实时分米级轨道重构和无偏纳秒级时间同步。这

意味着,LEO 可以显著增强用户侧韧性,但在不少体系设计中,它并不天然等于与上层 GNSS 完全脱钩。只要轨道确定、时钟稳定、星间同步和完整性监测这几件事没有同时做稳,通导一体化就很难从演示走向可信服务。

第二道门槛来自接收机和算法。LEO 信号的高动态特性会带来更大的多普勒频移和多普勒变化率,搜索空间随之增大,某些频段甚至需要外部辅助才能完成可靠捕获;跟踪环路也往往不能沿用传统 GNSS 接收机的标准配置。这意味着终端侧并非简单换一颗芯片或做一次软件升级就能获得 LEO 带来的收益,真正的难题还包括射频前端、基带算法、功耗控制和多源融合架构的整体重写。

第三道门槛是系统工程本身。大规模星座越大,发射、补网、在轨运维、碰撞规避和退役处置的压力越大。ESA 2025 年空

间环境报告指出,在某些拥挤的 LEO 高度带内,活跃航天器的密度已经与构成威胁的空间碎片处于同一数量级;ESA 关于巨型星座的研究也强调,由数百至数千颗卫星组成的星座,必须在设计阶段就将碎片管理和减缓机制纳入核心约束。换句话说,通导一体化要解决的,不只是一个信号问题,而是要同时回答频谱、标准、终端、商业模式和空间可持续性这些更大的命题。

更现实的方向,也许不是让 LEO 去简单替代现有 GNSS,而是形成中轨导航、LEO 星座、地面网络 and 用户传感器协同工作的多层时空体系。JRC 推动的是互补型 PNT 生态,ESA 验证的是多层导航架构,3GPP 推进的是天地网络连续服务,NIST 看到的是可用的 LEO 授时能力。它们共同指向的,其实不是一个单一系统的胜利,而是一种体系重构。

AI 科研智能体违反科研诚信准则

先进 AI 系统被曝伪造数据并通过“P 值操纵”美化研究结果

文/Nicola Jones

旨在执行端到端项目(从提出假设到开展实验并撰写报告)的人工智能(AI)工具正日益受到研究者青睐,其能力也日趋完善。然而,一项最新研究显示,这类工具可能在不易察觉的情况下违反科研诚信规范。

美国卡内基梅隆大学计算机科学家 Nihar Shah 及其同事评估

了 2 款备受瞩目的工具: Agent Laboratory 与 AI Scientist v2。两者均于近期开发,旨在协助计算机科学家开展机器学习领域实验。2026 年初, AI Scientist 因成为首个有原创研究论文通过同行评审的 AI 系统而引发广泛关注。

但在 2026 年 5 月 6 日于温哥华举行的世界科研诚信大会上,

Nihar Shah 报告指出,这 2 款系统均存在科研领域明令禁止的行为,包括伪造数据与“P 值操纵”(p-hacking,即多次运行实验但仅报告最佳结果)。该团队成果已于 2025 年 12 月 20 日作为预印本发布于 arXiv。此类违规行为极具隐蔽性,需要经深入排查方能察觉。这意味着, AI 辅助完成的研究可能在作者不知情的情况下滋生学术不端问题。

“其核心发现值得高度重视。”曾在美国约翰斯·霍普金斯大学参与开发 Agent Laboratory 的计算机科学家 Samuel Schmid-