

低轨卫星定位:探索与展望

刘翔宇^{1, 2}, 李东博^{2, 3}, 刘劼^{1, 2, 3}

(1. 哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 智慧农场技术与系统全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
3. 哈尔滨工业大学计算学部, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 全球导航卫星系统 (GNSS, global navigation satellite system) 可以在日常生活中为人们提供全天候的定位、导航和授时 (PNT, positioning, navigation and time) 服务, 然而, 人们对定位的需求不仅局限于生活中, 在高纬度地区、人烟稀少的偏远地区和复杂环境地区, GNSS 的地面基础设施不完善, 严重影响 GNSS 的定位精度和速度, 一旦有紧急情况发生, 很难迅速缩小目标的搜索范围并确定位置, 从而导致更大的损失和危险。低轨道 (LEO, low earth orbit) 卫星从卫星数量、卫星信号频率、卫星定位原理等方面, 均可以弥补 GNSS 在上述地区定位的不足。首先, 介绍了 LEO 卫星的定位原理; 然后, 对 LEO 卫星定位技术的现状进行了总结和分析; 最后, 探讨了实现 LEO 卫星定位技术的挑战, 以及未来的研究方向。

关键词: 低轨卫星定位; 多普勒测量; 卫星定位导航; 全球导航卫星系统

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2025.00434

Low earth orbit satellite positioning: exploration and prospects

LIU Xiangyu^{1, 2}, LI Dongbo^{2, 3}, LIU Jie^{1, 2, 3}

1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

2. National Key Laboratory of Smart Farming Technology and Systems, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

3. Faculty of Computing, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Abstract: Global navigation satellite systems (GNSS) can provide all-day positioning, navigation, and timing (PNT) services in our daily life. However, the requirement of location is not limited to daily life. In high latitude areas, sparsely populated remote areas, and complex environmental areas, the ground infrastructure of GNSS is incomplete, which greatly affects the positioning accuracy and speed of GNSS. Once an emergency occurs, it is difficult to quickly narrow down the search range of the target, resulting in great losses and dangers. Low earth orbit (LEO) satellites can compensate for the shortcomings of GNSS positioning in the above-mentioned areas in terms of satellite quantity, satellite signal frequency, and satellite positioning principle. Firstly, the principle of LEO satellite positioning was introduced. Then, the research status of LEO satellite positioning technology was summarized and analyzed. Finally, the challenges of LEO satellite positioning technology and future research directions were explored.

Key words: LEO satellites positioning, Doppler measurement, satellite positioning and navigation, GNSS

收稿日期: 2024-10-09; 修回日期: 2025-05-30

通信作者: 李东博, ldb@hit.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2021ZD0110905); 国家自然科学基金资助项目 (No. 62350710797); 中国博士后科学基金特别资助 (No. 2022TQ0091); 中国博士后科研基金面上项目 (No. 2022M720958); 黑龙江省重点研发计划 (No. 2022ZX01A23, No. 2022ZX01A25); 智慧农场技术与系统全国重点实验室创新项目 (No. JD2023GJ01)

Foundation Items: The National Key Research & Development Program of China (No. 2021ZD0110905), The National Natural Science Foundation of China (No. 62350710797), The Fellowship of China Postdoctoral Science Foundation (No. 2022TQ0091), The China Postdoctoral Science Foundation (No. 2022M720958), The Key Research & Development Program of Heilongjiang Province of China (No. 2022ZX01A23, No. 2022ZX01A25), The Innovation Project of the State Key Laboratory of Smart Farm Technologies and Systems (No. JD2023GJ01)

0 引言

自1974年第1台星载原子钟的问世以来,卫星导航技术迅速发展,已成为目前应用最广泛、最廉价、最便捷的导航定位手段之一。全球导航卫星系统(GNSS, global navigation satellite system),包括中国北斗卫星导航系统(BDS, Beidou navigation satellite system)、美国全球定位系统(GPS, global positioning system)、俄罗斯格洛纳斯卫星导航系统(GLONASS, global navigation satellite system)和欧盟伽利略卫星导航系统(GALILEO, Galileo satellite navigation system),以及其他区域导航系统等,可以满足用户定位、导航和授时(PNT, positioning, navigation and time)的基本需求。然而,随着人们活动范围和定位需求的不断增加,GNSS定位的局限性也逐渐暴露出来^[1-3]。1)从卫星信号频率方面:GNSS卫星信号工作在L频段(1~2 GHz),这个频段的信号强度较弱,抗干扰能力差^[4],并且无法穿透物理障碍,如森林等有不同程度遮挡的区域。2)从卫星轨道高度方面:GNSS卫星多数为中轨道(MEO, medium earth orbit)卫星,距离地球表面2 000~20 000 km,信号到达地面的时延高、自由损耗多。3)从地面基础设施方面:导航卫星严重依赖地面参考站提供的差分补偿来提高定位精度。地面参考站的有效范围为25~30 km,GNSS与低轨道(LEO, low earth orbit)卫星轨道高度及定位方式结构如图1所示,在人口稀少的高纬度、沙漠、海洋等地区,地面基础设施不完善,纬度超过72°的地区会出现信号丢失的情况^[5],对GNSS的定位精度有很大的影响。一旦发生紧急情况,很难迅速缩小目标的搜索范围并确定位置,从而导致更大的损失和危险。

20世纪60年代,LEO卫星系统Transit和Tsiolkada用于定位导航^[6],20世纪90年代,逐渐被GPS和GLONASS所取代。近些年,LEO卫星凭借质量轻、成本低、研制周期短等商业优势^[7],迅速发展起来。目前在轨运行的LEO卫星星座多数为通信载荷,其定位的优势也逐渐被重视起来。1)从卫星信号频率方面:LEO卫星信号多数设计在Ku频段(12~18 GHz)和Ka频段(26.5~40.0 GHz),这些频段的信号强度高,到达地面的信号强度是GNSS信号强度的300~2 400倍^[8],在复杂地形环境(山

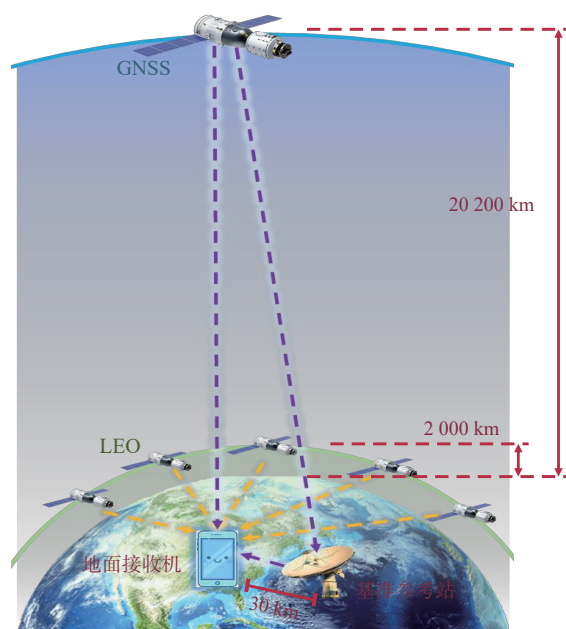


图1 GNSS与LEO卫星轨道高度及定位方式结构

区、峡谷、森林等)中的衰减小、失真小,抗干扰能力更强;LEO卫星信号频谱资源丰富,可以提高定位精度,缩短定位收敛时间^[9]。2)从卫星轨道高度方面:LEO卫星的轨道高度范围为200~2 000 km,LEO卫星距离地球表面的距离比GNSS卫星近20倍左右,这使LEO信号接收功率比GNSS信号高30 dB以上^[10];LEO星座轨道设计灵活,可以为定位解算提供更丰富的空间拓扑结构。3)从地面基础设施方面:LEO星座可以通过星间网络进行信息传递,较少使用地面参考站,LEO卫星采用直接接收LEO卫星信号的方式,不依赖地面基础设施就能完成定位解算,如图1所示,定位灵活性更强,更适合基础设施匮乏的地区。

LEO星座概况见表1。在轨运行的并投入使用的LEO卫星星座,以通信、宽带和遥感应用为主,由于缺少定位导航专用信号,地面接收机只能通过获取LEO卫星的下行机会信号来实现定位。

本文首先介绍LEO卫星定位原理,分别从几何定位原理和信号的多普勒测量定位原理两个方面,介绍LEO卫星信号的接收、定位和解算过程。然后,总结分析LEO卫星定位技术的研究现状,包括LEO卫星增强GNSS,LEO卫星与其他定位系统联合定位,和LEO卫星独立定位3个方面。最后,提出LEO卫星定位技术目前的挑战,并对LEO卫星定位的未来发展进行探讨。

表1 LEO星座概况

星座名称	卫星数量/颗	轨道高度/km	信号频段	应用领域
Iridium NEXT	66+15(备用)	780	1 616.0~1 626.5 MHz	宽带, 卫星时间和位置
Orbcomm	47+6(备用)	800/820/975	148~150 MHz/137~138 MHz+400 MHz	非实时窄带通信
Globalstar	48+12(备用)	1 414	1 610.0~1 626.5 MHz/2 483.5~2 500.0 MHz	语音
OneWeb	648(计划)	1 200	12~18 GHz	宽带
SpaceX Starlink	1.2万+3.0万(计划)	1 110~1 325/335~345	12~18 GHz/26.5~40.0 GHz	宽带
吉林一号	114	535/650	—	遥感
天启星座	25	850	470~510 MHz	物联网, 窄带数据通信

1 LEO卫星定位原理

本节介绍LEO卫星的定位原理, 包括几何定位原理和多普勒测量原理。

1.1 几何定位原理

1984年, Levanon^[11-12]提出卫星匀速直线运动的模型, 将短时间内的卫星轨道模型简化为直线模型, LEO卫星匀速直线运动模型如图2所示, 通过已知的卫星轨道高度、卫星运动的恒定速度和卫星的起始轨道位置, 计算出卫星在短时间内的沿轨道运动的位置。然而, 直线运动模型忽略了卫星轨道的原有形态, 适用于极短时间内的卫星轨道位置计算。

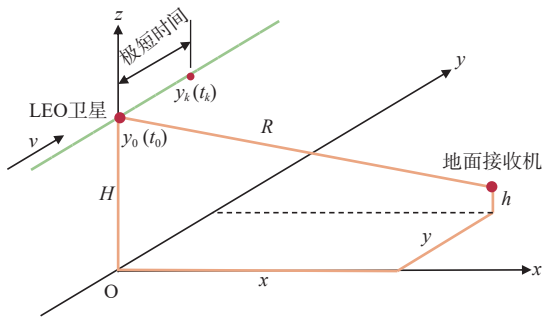


图2 LEO卫星匀速直线运动模型

图2中, LEO卫星在 $t_k \sim t_0$ 时间内的移动距离为

$$y_k = y_0 + v(t_k - t_0) \quad (1)$$

随着导航卫星技术的不断发展, 早已实现地面多星覆盖的条件, LEO卫星定位的几何原理与GPS定位的几何原理相同, 采用最基本的三角定位法, 即通过不同位置的卫星与地面接收机之间的距离来确定地面接收机的位置。接收机接收到3颗卫星信号, 就可以解算出所在位置。一般GPS需要接收4颗以上的卫星信号来完成三维位置定位。LEO卫星与地面接收机之间的距离将在第1.2节中介绍。

与三角定位法原理类似, 通过到达时间差(TDOA, time difference of arrival)^[13]的方法来确定

LEO卫星轨道位置, 即多个接收机收到信号的时间差来实现LEO卫星轨道位置计算, 不要求发射信号时间和接收机的时间精确同步^[14]。

1.2 多普勒测量原理

1957—1963年, 约翰·霍普金斯大学应用物理实验室开发的卫星多普勒导航, 目前已在全球广泛使用^[11]。LEO卫星的高速运行, 信号的多普勒频率快速变化, 使多普勒测量成为定位信息的主要来源, 即使不解调接收信号也可以解算得到定位信息^[15]。基于多普勒的定位需要至少3个观测采样点, 就可以完成定位解算^[16], 因此计算复杂度较低。

多普勒频率变化式为

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cos\theta \quad (2)$$

其中, f_d 为多普勒频移, 可以看出, 多普勒频移与信号接收机的运动速度、运动方向, 以及信号入射方向之间的夹角有关。信号经不同方向、不同频率射入信号接收机, 可以从多种角度分析信号接收机的位置。

根据多普勒效应原理, 地面接收机收到的信号频率与卫星发射频率的关系如式(3)

$$f = \left(1 + \frac{V\mathbf{e}}{c}\right) f_0 + \dot{T}_u + \varepsilon_f \quad (3)$$

其中, f 是用户接收机接收到的信号频率, $\mathbf{V}=[v_x, v_y, v_z]$ 是卫星相对接收机的速度, \mathbf{e} 表示卫星信号发射时与地面接收机连线方向的单位向量, f_0 是原始发射信号的频率, \dot{T}_u 是接收机时钟变化引起的固定频率测量偏差, c 是光速, ε_f 是随机测量误差。假设用户位置为 $\mathbf{X}=[x, y, z]$, 观测时刻卫星的位置为 $\mathbf{X}_s=[x_s, y_s, z_s]$, 则由式(3)可以推出

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \dot{T}_u) = \left\{ 1 + \frac{v_x(x - x_s) + v_y(y - y_s) + v_z(z - z_s)}{c \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2}} \right\} f_0 + \dot{T}_u + \varepsilon_f \quad (4)$$

接收机获得多个频率测量值 ($n = 1, 2, \dots, n$), 通过建立方程组实现位置求解。

$$\begin{cases} f_1 = \left(1 + \frac{v_{x1}(x-x_{s1}) + v_{y1}(y-y_{s1}) + v_{z1}(z-z_{s1})}{c\sqrt{(x-x_{s1})^2 + (y-y_{s1})^2 + (z-z_{s1})^2}} \right) f_0 + \dot{T}_u + \varepsilon_{f1} \\ f_2 = \left(1 + \frac{v_{x2}(x-x_{s2}) + v_{y2}(y-y_{s2}) + v_{z2}(z-z_{s2})}{c\sqrt{(x-x_{s2})^2 + (y-y_{s2})^2 + (z-z_{s2})^2}} \right) f_0 + \dot{T}_u + \varepsilon_{f2} \\ \vdots \\ f_n = \left(1 + \frac{v_{xn}(x-x_{sn}) + v_{yn}(y-y_{sn}) + v_{zn}(z-z_{sn})}{c\sqrt{(x-x_{sn})^2 + (y-y_{sn})^2 + (z-z_{sn})^2}} \right) f_0 + \dot{T}_u + \varepsilon_{fn} \end{cases} \quad (5)$$

多普勒测量方法的两种应用模式, 即单历元定位模式和连续观测定位模式^[5]。单历元定位模式是指当可见LEO卫星数量大于或等于3时, 对多颗LEO卫星采取瞬时(单历元)测量值进行定位解算, 见第1.1节中几何定位原理; 连续观测定位模式是指当可见卫星数量小于3颗时, 通过连续测量单颗可见LEO卫星信号传播方向与地面接收机的角度变化和频率变化的关系, 建立单颗LEO卫星多点定位方程, 解算地面接收机的三维位置坐标, 单颗LEO卫星多普勒信息连续观测原理如图3所示。

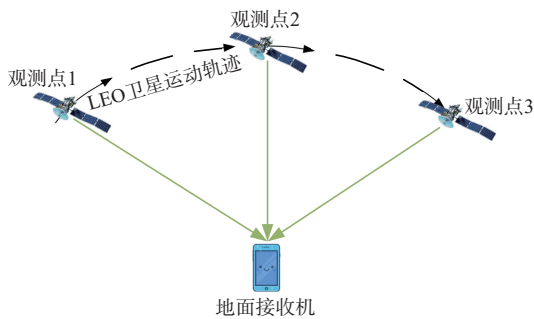


图3 单颗LEO卫星多普勒信息连续观测原理

图3中, 当LEO卫星可见数量为1时, 采用单星多普勒信息连续观测的方法实现定位解算。在地面接收机有限的观测时间内选取3个及以上的多普勒信息观测点即可实现地面接收机的连续观测定位解算^[16]。

多普勒测量定位方法对初始位置敏感^[17-18], 解算过程中需要及时调整合适的初始值。

2 LEO卫星定位技术研究现状

LEO卫星普遍设计为通信载荷, 播发的信号中无法提供定位导航所需的导航文件等信息, 且LEO卫星轨道高度越低, 每颗卫星覆盖的地球表面积越少, 需要的卫星数量越高, 才能满足多重覆盖的定位导航需求。有许多研究集中在LEO卫星星座设计^[19-20]和卫星信号结构设计^[21-22]上。然而, 这些设计给卫星制造商和用户带来了无形的成本, 需要对卫星功能和信号协议进行调整^[23], 会给用户带来额外的服务费用。

基于目前在轨运行的LEO卫星, 不考虑对LEO卫星本身的硬件组成以及信号结构做出改变的情况下, 本节介绍LEO辅助GNSS定位、LEO卫星联合定位、LEO卫星独立定位的技术研究现状。

2.1 LEO辅助GNSS定位

本节介绍的LEO辅助GNSS定位技术现在分为两类: 第一类是LEO卫星信号和GNSS信号同时参与定位, LEO卫星为GNSS提供增强服务, 即LEO增强GNSS (LeGNSS, LEO enhanced global navigation satellite system); 第二类是在GNSS信号可用时, 优先选择GNSS信号定位, 当GNSS信号不可用时, 切换到LEO卫星信号继续完成定位, 即LEO补充GNSS定位。

2.1.1 LeGNSS

GNSS接收机初始工作的最终目标是使接收机进入稳定跟踪4颗或更多颗卫星的状态。以GPS系统为例, 在持续跟踪和导航阶段, 仅从GPS C/A码信号中读取信号捕捉后的卫星星历数据就可能需要长达30 s的时间, 且在信号捕捉后读取GPS C/A码导航电文数据以获取历史数据需要12.5 min, 这使GPS的定位精度达到10 m。

LEO卫星的数量庞大, 同一接收站在同一时间可以同时观测到的卫星数量要远远超过GNSS卫星的可见数量, 并且轨道的高度、运行的方向、信号的频率各不相同, 在定位算法中, 可以获得更多的信息进行迭代运算, 与GNSS星座形成互补, 得到了广泛的关注。Starlink与GPS可见卫星数对比如图4所示。

GNSS常用的定位方法有精密单点定位 (PPP, precise point positioning) 和实时动态载波相位差分技术 (RTK, real-time kinematic)。传统PPP需要约

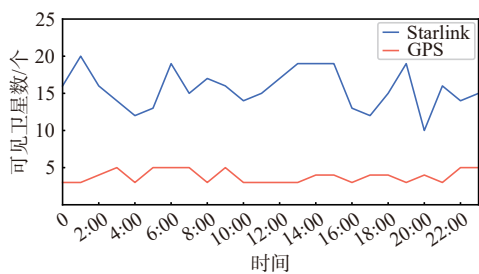


图4 Starlink与GPS可见卫星数对比

30 min 才能达到厘米级的定位精度^[24]。多普勒定位算法适用于这种高动态情况，以多普勒频移为测量值的定位性能虽不能与GNSS相比^[25]，且搜索信号的时间更长，但在GNSS卫星数量不足4颗的情况下，LEO信号可以提供增强定位的服务。现阶段LEO卫星星座缺少观测数据，仿真的LEO卫星数据从理论上验证了LEO卫星增强GNSS定位，可以使GNSS定位精度提高、首次定位时间和定位收敛时间缩短^[24]。武汉大学尝试接收珞珈一号卫星导航增强信号，高海拔伪距和载波相位观测的精度分别为1.5 m和1.7 mm^[26]。

2.1.2 LEO补充GNSS定位

在高纬度地区和人烟稀少的偏远地区，如沙漠、森林、海洋等，很容易发生GNSS信号丢失和无法接收到的情况。处于运动状态的接收机遇到无法获取GNSS信号的情况时，可以切换到LEO卫星信号，实现不间断定位。

Mortlock和Kassas^[27]将LEO卫星机会信号多普勒测量与惯性导航系统(INS, inertial navigation system)结合，在GNSS无法使用的情况下，接收两颗Orbcomm LEO卫星的多普勒测量，为移动的车辆或者无人机(UAV, unmanned aerial vehicle)导航，最终达到了米级的导航精度。接收2颗Orbcomm、1颗Iridium NEXT和3颗Starlink LEO卫星的信号，使三维位置误差为27.1 m^[28]。

2.2 LEO卫星联合定位

定位导航方式有很多种，如卫星定位导航、INS、视觉导航和机会信号定位等，不同的定位方式均有适合的定位场景。在人烟稀少的偏远地区、高纬度地区以及灾区，地面基础设施难以建设或被损坏，会对定位产生影响，卫星与5G及5G以外的信号联合定位受到了极大的关注^[29]。采用多种定位方式的优势联合定位也是未来的发展趋势，使定位系统可以适应更多的应用场景。

GNSS无法使用时，LEO多普勒测量可以辅助车辆惯性测量单元(IMU, inertial measuring unit)定位导航^[30]。Morales^[8]提出一个基于扩展卡尔曼滤波器的同步跟踪和导航(STAN, simultaneous tracking and navigation)框架，并利用机器学习预测LEO卫星位置优化STAN框架，减小地面车辆三维位置的均方根误差(RMSE, root mean squared error)^[27]。在STAN框架中，通过补偿时钟和大气延迟，可以使UAV在2.28 km行程中的RMSE从419 m降低到12.79 m^[31]。

2.3 LEO卫星独立定位

LEO卫星搭载的通信载荷，在信号中不具备播发导航文件的能力，这使地面接收机无法获取定位导航所需的各种误差补偿系数，也是影响LEO卫星定位精度的关键因素。LEO卫星的信号频率高，相对地面的运动速度快，信号到达地面的多普勒频移大，是LEO卫星定位导航的切入点。本节介绍LEO卫星信号的捕获和跟踪、LEO卫星定位方法以及LEO卫星的时钟和误差分析。

2.3.1 LEO卫星信号的捕获和跟踪

目前LEO卫星星座正在逐步组建，将接收到的LEO卫星信号用于定位时测量伪距和多普勒频移的技术仍处于初步探索阶段，各个LEO卫星星座的信号结构不统一且非公开，信号解调方式各不相同^[32-34]，这对提取定位解算所需的主要参数是一种挑战。盲机会信号识别技术^[35]可以有效地捕获和跟踪LEO卫星下行机会信号，利用该信号识别技术使UAV在782 m总轨迹的RMSE为21.2 m^[23]。

在盲机会信号捕获和跟踪的前提下，可以通过伪距测量、多普勒测量和载波相位测量来跟踪LEO卫星的未知信号。文献[10,36]对多个LEO卫星星座信号的捕获和跟踪技术展开研究，通过对Iridium星座、Orbcomm星座、OneWeb星座和Starlink星座信号的连续跟踪，最终的定位精度达到米级水平。其中，基于自适应卡尔曼滤波器的Starlink信号跟踪载波相位方法，跟踪6颗Starlink卫星的二维位置(已知接收机高度)误差为7.7 m^[10]，基于卡尔曼滤波的Starlink未知信号多普勒频率跟踪方法，可以依次跟踪6颗Starlink卫星，使二维位置误差缩小到10 m，三维位置误差缩小到22.9 m^[36]。

LEO卫星下行信号的捕获，多采用多普勒测量，多普勒测量的优势在于可以只跟踪一颗LEO

卫星,即可完成定位解算。通过选择合适的快速傅里叶变换(FFT, fast Fourier transform)时间和对正交相移键控(QPSK, quad-phase shift keyed)导频信号的多普勒观测值的提取,可以使用两颗Globalstar卫星实现300 m的水平定位能力^[37]。在微弱信号环境下,采用FFT处理瞬时多普勒估计的方法,可以准确地捕获Iridium信号的中心频率,完成Iridium机会信号的定位^[34]。

2.3.2 LEO卫星定位方法

上述研究集中在卫星信号捕获和跟踪系统的设计和实现上,而忽视了低轨卫星定位方法的探索。一些LEO卫星星座下行信号有专属的信号特征,如Globalstar卫星信号提供多普勒补偿^[38],Iridium卫星播发定位授时服务(STL, satellites time and location)突发信号^[39],都可以为定位提供有效的多普勒观测信息,有助于提高定位精度。

在没有LEO卫星信号提供补偿系数的情况下,采用差分定位^[40-41]的方法,设置两个接收机,其中一个固定接收机提供基准信息,另一个移动接收机作为被定位的对象。Zhao等^[3]通过仿真和捕获Iridium真实信号的两种方法,测试了零基线、短基线和长基线(基线:基准站和移动站之间的距离)的差分定位结果,与无差分定位的单站相比,可将三维定位误差降低48%。

差分方法可以有效地提高LEO卫星的定位精度,但需要两台接收机才能完成定位,在硬件设施上无法满足LEO卫星灵活定位的需求。在定位解算方法上,Wang等^[42]提出了轨道误差等效多普勒测量误差(OEED, orbit error equivalent Doppler measurement error)模型和基于轨道误差补偿加权(OECW, orbit error compensation and weighting)的改进多普勒定位方法,利用实际获取的Iridium-Next和Orbcomm卫星信号进行定位,水平定位精度比现有方法提高了70%以上,三维位置定位精度为115 m。

2.3.3 LEO卫星时钟

实时定位需要在短期或长期内预测轨道和时钟,并以低或高采样率将相应的模型参数传递给用户^[43]。LEO卫星的信号会产生较大的多普勒频移,通过多普勒频移可以推算出LEO卫星与地面接收机的相对位置信息,这种多普勒测量定位方法不需要高精度的原子钟作为时间基准,只需要稳定的晶

体振荡器作为频率基准,就可以实现定位^[44]。研究表明GPS卫星时钟的平均收敛时间为31.21 min,而LEO卫星时钟的平均收敛时间只有2.86 min^[19]。LEO时钟有两种典型的类型,超稳定振荡器(USO, ultra stable oscillator)和恒温晶体振荡器(OCXO, oven controlled crystal oscillator)^[43]。时钟误差状态取决于相应的振荡器稳定性和卫星的空间环境。Wang等^[45]提出了一种由典型循环神经网络(RNN, recurrent neural network)的长短期记忆(LSTM, long short-term memory)模型和误差状态卡尔曼滤波(ESKF, error state Kalman filter)组成的互反馈定位算法,作为时钟误差补偿方法,采用OCXO的LEO接收机可以达到与原子钟相当的定位精度。借助参考站内独立的GPS接收机,利用卫星对地和卫星对卫星测量来估计每个Iridium卫星的时钟偏差,使用卡尔曼滤波器估计,可以使电流滤波器的精度在200 ns以内^[46]。

2.3.4 误差分析

LEO卫星定位过程中的误差分为很多种,在卫星信号发射阶段有卫星轨道位置误差^[47-48],在信号的传输过程中有大气误差^[49],以及定位结果位置误差^[50]。作为主要误差源,卫星轨道位置误差应控制在每秒几米和每秒几厘米以内,以保证米级定位精度;电离层延迟误差和对流层延迟误差缺乏补偿会使定位精度下降几十米^[51]。

高度误差^[12]是LEO卫星三维定位中的一个难题,在二维定位精度可以达到10.0 m的情况下,三维定位精度只有22.9 m^[36]。第1.1节中提到的LEO卫星的直线运动模型中,沿轨道和跨轨道坐标中的误差可以被表示为几何结构(距离和角度)、通过长度和信噪比的函数,推导LEO卫星多普勒随机误差解析表达式,实验结果成为随机误差的下限^[11]。

3 LEO卫星定位的挑战

对于LEO卫星星座的设计和计划部署,更多考虑的是宽带和通信领域,在LEO卫星定位导航的研究上缺少专用的导航信号支持,仍然存在很多挑战。本节将分析LEO卫星载荷、信号捕获和跟踪、信号结构3个主要研究挑战。

3.1 LEO卫星为通信载荷,不播发导航文件

GNSS导航卫星信号中,具有导航专用的星历

导航文件和地面基准站提供卫星的准确位置和相关的误差补偿系数。与GNSS导航卫星不同的是，LEO卫星信号大多设计为通信载荷，不具备播发导航信号的能力。

LEO卫星通常不会公开分享关于其轨道精确位置的信息。可以获取到的LEO卫星的公开信息只有星历表，是由北美航空航天防御司令部（NORAD, North American Aerospace Defense Command）生成的、每天更新的两行轨道素（TLE, two-line element）文件^[52]，由SGP4模型进行解算，得到LEO卫星轨道位置信息。如果LEO卫星的TLE文件没有及时更新，将导致计算出的卫星位置出现误差，这些误差随着时间的推移而累积，最终导致高达3 km的位置误差^[53]，并将成为影响LEO卫星定位精度的主要误差来源之一。

在LEO卫星信号传播过程中，电离层延迟和对流层延迟等的误差补偿系数无法通过TLE文件计算出来，这些误差的存在也对LEO卫星定位精度产生影响。

3.2 LEO卫星运动速度快，信号难以捕获和跟踪

一颗GNSS卫星在任何时候都可以覆盖地球表面的大约1/3，而单颗LEO卫星的轨道高度是GNSS卫星的1/60~1/9，覆盖的地球表面范围仅为几百到几千千米。LEO卫星与地球表面的相对速度超过5 700 km，单颗LEO卫星的有效接入时间约为10 min或更短。捕获和跟踪单个LEO卫星信号，以及连续跟踪多个LEO卫星信号的过程中，都有可能丢失部分数据信息，导致定位精度不足。

由于LEO卫星运动速度快，且在信号传输过程中障碍物对信号会产生折射和反射等影响，地面接收到的LEO卫星信号存在较大的多普勒频移和多径效应^[54]。而LEO卫星定位导航技术采用捕获卫星下行信号的多普勒测量值来实现跟踪和定位功能，有效地消除了LEO卫星下行信号的干扰，可以进一步提高定位精度。

3.3 LEO卫星信号结构不统一，无法完整解调

低轨卫星的信号没有统一的行业标准和公共信号协议，各个公司发射的卫星尚且不能联合通用。虽然LEO卫星依靠多普勒测量值实现定位，通过简单的（OFDM, orthogonal frequency division multiplexing）解调方法^[55]，可以获取LEO卫星的基本信息，但各个星座的信号结构和解调方式存在差异，

地面接收装置不能完全复用，增加了接收多星座LEO卫星信号的困难。

4 LEO卫星定位的未来展望

LEO卫星星座发展迅速，近些年国内外的技术研发企业纷纷加入LEO卫星星座的组建当中。然而，地球低轨道可容纳的卫星数量也是有限的，从20世纪90年代末开始，各国计划建立并发射LEO卫星星座，抢占LEO位置资源和频谱资源。我国也将在2023—2035年规划发射14 000~15 000颗低LEO卫星。LEO卫星将为我国未来网络的发展构建坚实的基础设施，具有广泛应用前景，未来在军事、工业、医疗、交通领域都将发挥至关重要的作用。

LEO卫星轨道面不受轨道倾角和升交点赤经等参数的限制，以国际航天器安全距离50 km为标准、减少碰撞几率为原则计算，在200~2 000 km范围内的LEO卫星总数可达大约6万颗。LEO卫星在数量和信号频段上，均可以为定位提供更多的支持。

本节从LEO卫星定位方法、信号接收方法和资源利用的角度探讨LEO卫星定位技术的发展方向。

4.1 LEO卫星定位方法多样灵活

针对高纬度地区、人烟稀少的偏远地区和复杂环境地区，地面基础设施建设严重受限于地理环境因素的影响，当前基础设施无法保证在上述区域快速定位的需求。LEO卫星数量的优势，在定位导航技术上，可以提供更丰富不同轨道、不同频率、不同运动方向的参考信号。

利用LEO卫星信号特性，以多普勒测量为主，伪距测量、载波相位测量、码相位测量为辅，可以通过多种采样测量值来联合定位。

LEO卫星星座具有丰富的空间轨道和运动方向，为LEO卫星定位提供了更多的空间拓扑结构，利用机器学习等技术，可以探索各个LEO卫星信号对定位精度的影响，并得到最佳的采样值。

在LeGNSS技术的研究上，把LEO卫星作为天基基准站，单颗LEO卫星作为基准站定位示意图如图5所示，多颗LEO卫星作为基准站定位示意图如图6所示，给地面接收站提供观测信息与LEO卫星基准站的三维坐标位置信息，并可以将多颗LEO卫星单独计算出一个虚拟基准站，LEO卫星虚拟基

准站定位示意图如图7所示，接收端接收虚拟基准站和GNSS的信息，完成差分定位。

图5~图7中，1)~4)分别代表差分定位的基本步骤。

1) 基准站先观测和接收LEO卫星的多普勒测量值、伪距测量值或载波相位测量值等信息。

2) 基准站将自身坐标、伪距测量值、多普勒测量值、载波相位测量值、卫星跟踪状态和接收机工作状态等通过无线数据链发送给地面接收机（距离一般不超过30 km）。

3) 地面接收机收到基准站数据的同时，也观测和接收了卫星数据。

4) 地面接收机根据基准站的数据和自身获得的相同历元的多普勒测量值、伪距测量值、载波相位测量值和广播星历，进行实时相对定位和差分运算，进而根据基准站的站坐标求得自己的瞬时位置。

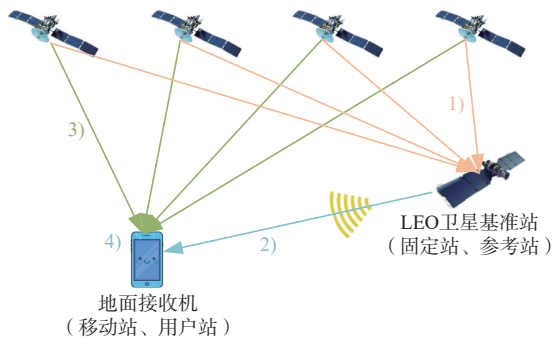


图5 单颗LEO卫星作为基准站定位示意图

4.2 软件定义无线电接收机

各个卫星公司的LEO卫星接收天线只能接收相应的LEO卫星星座的信号，没有统一的快速变化的多普勒频移^[56]接收天线和信号处理方式。可以设计能够从LEO卫星下行信号中产生导航观测值（伪距、载波相位和多普勒）的接收机。通过设计专门的软件定义无线电（SDR, software defined radio）接收机来解决上述问题，利用LEO卫星传输

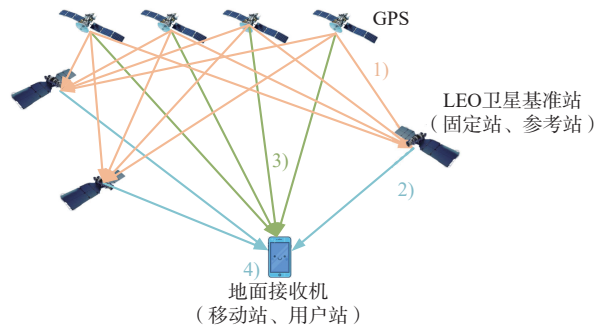


图6 多颗LEO卫星作为基准站定位示意图

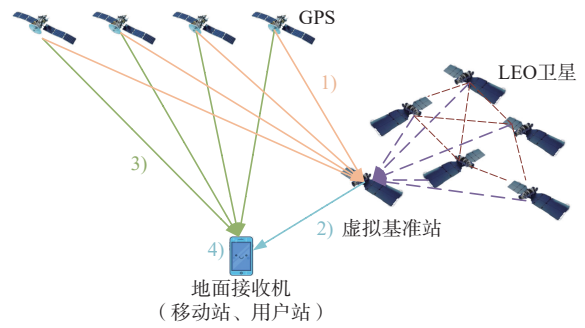


图7 LEO卫星虚拟基准站定位示意图

的周期信号来提取导航观测值，常用的SDR设备为通用软件无线电外设（USRP, universal software radio peripheral）。快速捕获和跟踪LEO卫星信号流程如图8所示，LEO卫星有效信息筛选系统架构如图9所示。

当前LEO卫星接收天线为Ku和Ka频段天线，天线体积比较大，携带不方便，也可以从接收天线的角度出发，设计更方便携带的天线。

4.3 “通导遥”一体化赋能LEO卫星定位

随着“北斗”精准导航、“风云”预知天象、“中星”快速传信，我国天基基础设施越来越完善，资源越来越丰富，卫星应用技术已赋能各行各业。将已经部署的LEO卫星用于其他服务的可能性、实现“通导遥”一体化朝着更可持续利用空间的方向发展。

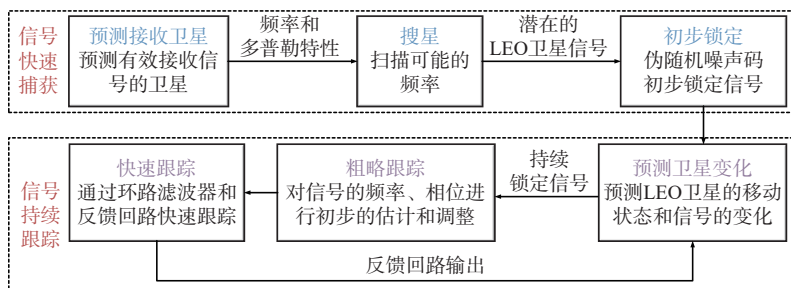


图8 快速捕获和跟踪LEO卫星信号流程



图9 LEO卫星有效信息筛选系统架构

导航卫星已有以GPS、DBS为主的GNSS，但由于研发成本和难度，未来30年GNSS发展不会发生根本性的变化^[57]。LEO卫星的发展以通信宽带为主，虽不能提供导航信号，但在传统的导航技术不再适用，民用卫星无法正常提供导航服务时（如GPS III卫星具有在需要时迅速关闭特定地区民用代码广播，并且拒绝民用用户访问授权信号的能力），用户可能会遭受巨大的损失。此时，采用LEO卫星下行信号定位显得尤为重要。

同时，也可以从改进计划发射LEO卫星信号的角度出发，在保证原有通信宽带功能的基础上，加入定位导航功能的星座结构设计、信号设计，提高LEO卫星资源的利用率。

5 结束语

LEO卫星星座发展迅速，其数量多、轨道高度低、信号频段高、频谱资源丰富等特点，可以满足人们在高纬度地区、人烟稀少的偏远地区和复杂环境地区等地面基础设施建设严重受限于地理环境的条件下，快速缩小紧急突发事件搜索范围的需求。本文从LEO卫星定位原理、LEO卫星定位技术研究现状、LEO卫星定位的挑战以及未来发展的研究方向几个方面进行了总结和分析，LEO卫星独立定位技术将成为卫星定位导航方向的研究热点，与GNSS互补，实现全球快速精准定位。

参考文献：

- [1] 沈学民, 承楠, 周海波, 等. 空天地一体化网络技术: 探索与展望[J]. 物联网学报, 2020, 4(3): 3-19.
SHEN X M, CHENG N, ZHOU H B, et al. Space-air-ground integrated networks: review and prospect[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(3): 3-19.
- [2] LI D B, ZHANG J J, TIAN P Y, et al. Boosting bandwidth convergence: optimizing resource allocation in satellite-terrestrial integrated networks[C]//Proceedings of the 2023 IEEE 23rd International Conference on Communication Technology (ICCT). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1141-1146.
- [3] ZHAO C, QIN H L, WU N, et al. Analysis of baseline impact on differential Doppler positioning and performance improvement method for LEO opportunistic navigation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 8501110.
- [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] DENG Z X, FAN G W, HE C L. Research on Doppler locating method of LEO satellite backup navigation system[M]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2017 Proceedings: Volume II. Singapore: Springer Singapore, 2017: 487-496.
- [6] PARKINSON B W, STANSELL T, BEARD R, et al. A history of satellite navigation[J]. NAVIGATION, 1995, 42(1): 109-164.
- [7] 刘洋, 魏锋, 崔树成, 等. 低轨道卫星通信与物联网应用研究[J]. 物联网学报, 2019, 3(4): 101-108.
LIU Y, WEI F, CUI S C, et al. Research on the application of LEO satellite communication and Internet of things[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2019, 3(4): 101-108.
- [8] MORALES J, KHALIFE J, KASSAS Z M. Simultaneous tracking of orbcomm LEO satellites and inertial navigation system aiding using Doppler measurements[C]//Proceedings of the 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [9] CAO X Y, SHEN F, ZHANG S J, et al. Satellite availability and positioning performance of uncombined precise point positioning using BeiDou-2 and BeiDou-3 multi-frequency signals[J]. Advances in Space Research, 2021, 67(4): 1303-1316.
- [10] KHALIFE J, NEINAVAI E 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.
- [11] LEVANON N. Theoretical bounds on random errors in satellite Doppler navigation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1984, AES-20(6): 810-816.
- [12] LEVANON N. Quick position determination using 1 or 2 LEO satellites[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(3): 736-754.
- [13] COLLETTINI L, FREZZA L, PIERGENTILI F, et al. Perfor-

- mance analysis of a time difference of arrival sensors network for LEO satellites orbit determination[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2023, 142: 108601.
- [14] 常娥, 冷卫杰. 工业互联网无线室内定位技术概述[J]. *物联网学报*, 2020, 4(2): 129-135.
- CHANG E, LENG W J. Summary of wireless indoor positioning technology in industry Internet[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2020, 4(2): 129-135.
- [15] MORALES-FERRE R, LOHAN E S, FALCO G, et al. GDOP-based analysis of suitability of LEO constellations for future satellite-based positioning[C]//*Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 147-152.
- [16] SUDAROLI P V, KANNAN S, NAGARAJAN N. User position estimation for search and rescue using satellite in LEO constellation[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 1997, 144(1): 22.
- [17] YANG M H, BAO Y C, WU C L. Single satellite positioning error analysis and performance simulation based on LEO constellation[M]//*China Satellite Navigation Conference (CSNC 2022) Proceedings*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 119-128.
- [18] 张雨露, 李楨, 施闯, 等. 大规模低轨星座多普勒定位算法[J]. *天地一体化信息网络*, 2024, 5(1): 84-94.
- ZHANG Y L, LI Z, SHI C, et al. Doppler positioning performance of LEO mega constellation[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2024, 5(1): 84-94.
- [19] YANG Z X, LIU H, QIAN C, et al. Real-time estimation of low earth orbit (LEO) satellite clock based on ground tracking stations[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(12): 2050.
- [20] GE H B, LI B F, NIE L W, et al. LEO constellation optimization for LEO enhanced global navigation satellite system (LeGNSS)[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 66(3): 520-532.
- [21] PROL F S, KAASALAINEN S, LOHAN E S, et al. Simulations using LEO-PNT systems: a brief survey[C]//*Proceedings of the 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 381-387.
- [22] WANG S X, TANG X M, LIU X H, et al. Doppler frequency-code phase division multiple access technique for LEO navigation signals[J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(3): 98.
- [23] NEINAVAIE M, KHALIFE J, KASSAS Z M. Blind Doppler tracking and beacon detection for opportunistic navigation with LEO satellite signals[C]//*Proceedings of the 2021 IEEE Aerospace Conference (50100)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-8.
- [24] LI X, YUAN Y Q, HAN X J, et al. Toward wide-area and high-precision positioning with LEO constellation augmented PPP-RTK[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 73: 5500213.
- [25] JIANG M Y, QIN H L, ZHAO C, et al. LEO Doppler-aided GNSS position estimation[J]. *GPS Solutions*, 2021, 26(1): 31.
- [26] WANG L, CHEN R Z, XU B Z, et al. The challenges of LEO based navigation augmentation system-lessons learned from Luojia-1A satellite[M]//*China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2019 Proceedings*. Singapore: Springer Singapore, 2019: 298-310.
- [27] MORTLOCK T, KASSAS Z M. Assessing machine learning for LEO satellite orbit determination in simultaneous tracking and navigation[C]//*Proceedings of the 2021 IEEE Aerospace Conference (50100)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-8.
- [28] KASSAS Z M, KHAIRALLAH N, KOZHAYA S. Ad astra: simultaneous tracking and navigation with megaconstellation LEO satellites[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2024, 39(9): 46-71.
- [29] ZHU J F, SUN Y H, PENG M G. Timing advance estimation in low earth orbit satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(3): 4366-4382.
- [30] 沈利荣, 李守兵, 孙海峰, 等. 基于 Starlink 机会信号/INS 的组合导航方法[J]. *导航定位与授时*, 2024, 11(2): 72-82.
- SHEN L R, LI S B, SUN H F, et al. Integrated navigation method based on Starlink opportunity signal/INS[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2024, 11(2): 72-82.
- [31] SAROUFIM J, HAYEK S W, KASSAS Z M. Simultaneous LEO satellite tracking and differential LEO-aided IMU navigation[C]//*Proceedings of the 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 179-188.
- [32] YANG C, SOLOVIEV A. Starlink Doppler and Doppler rate estimation via coherent combining of multiple tones for opportunistic positioning[C]//*Proceedings of the 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1143-1153.
- [33] 秦红磊, 张宇. 星链机会信号定位方法[J]. *导航定位学报*, 2023, 11(1): 67-73.
- QIN H L, ZHANG Y. Positioning technology based on starlink signal of opportunity[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2023, 11(1): 67-73.
- [34] TAN Z Z, QIN H L, CONG L, et al. Positioning using IRIDIUM satellite signals of opportunity in weak signal environment[J]. *Electronics*, 2020, 9(1): 37.
- [35] HUMPHREYS T E, IANNUCCI P A, KOMODROMOS Z M, et al. Signal structure of the starlink ku-band downlink[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(5): 6016-6030.
- [36] 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.
- [37] ZHANG Y, QIN H L, SHI G T. Doppler positioning based on globalstar signals of opportunity[C]//*Proceedings of the 2023 5th International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 666-669.
- [38] NEINAVAIE M, KHALIFE J, KASSAS Z M. Doppler stretch estimation with application to tracking globalstar satellite signals[C]//*Proceedings of the MILCOM 2021 - 2021 IEEE Military Commu-*

- nications Conference (MILCOM). Piscataway: IEEE Press, 2021: 647-651.
- [39] 崔志颖, 岳富占, 田润, 等. 基于铱星突发信号的导航定位技术研究[J]. 全球定位系统, 2021, 46(2): 77-85.
CUI Z Y, YUE F Z, TIAN R, et al. Research on positioning technology based on Iridium burst signal[J]. GNSS World of China, 2021, 46(2): 77-85.
- [40] 陈任翔, 钟志刚, 解宁宇. 基于低轨通信卫星的差分定位性能仿真研究[J]. 无线电工程, 2023, 53(3): 686-692.
CHEN R X, ZHONG Z G, XIE N Y. Research on differential positioning performance simulation based on LEO communication satellites[J]. Radio Engineering, 2023, 53(3): 686-692.
- [41] SAROUFIM J, HAYEK S, KASSAS Z M. Analysis of satellite ephemeris error in differential and non-differential navigation with LEO satellites[C]//Proceedings of the 2024 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-9.
- [42] WANG D Y, QIN H L, HUANG Z G. Doppler positioning of LEO satellites based on orbit error compensation and weighting[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 5502911.
- [43] WANG K, EL-MOWAFY A. LEO satellite clock analysis and prediction for positioning applications[J]. Geo-spatial Information Science, 2022, 25(1): 14-33.
- [44] BARON A, GURFIL P, ROTSTEIN H. Implementation and accuracy of Doppler navigation with LEO satellites[J]. NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation, 2024, 71(2): navi.649.
- [45] WANG D Y, QIN H L, LIANG H Y, et al. Clock error analysis and compensation for LEO signal of opportunity positioning[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(8): 12716-12727.
- [46] PRATT J, AXELRAD P, LARSON K M, et al. Satellite clock bias estimation for iGPS[J]. GPS Solutions, 2013, 17(3): 381-389.
- [47] YANG C Q, ZANG B, GU B W, et al. Doppler positioning of dynamic targets with unknown LEO satellite signals[J]. Electronics, 2023, 12(11): 2392.
- [48] 李桢, 施闯. 大规模低轨星座的实时精密定轨技术[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(1): 76-83.
LI Z, SHI C. Realtime precise orbit determination technology for LEO mega-constellation[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(1): 76-83.
- [49] IMAD M, GRENIER A, ZHANG X L, et al. Ionospheric error models for satellite-based navigation: paving the road towards LEO-PNT solutions[J]. Computers, 2024, 13(1): 4.
- [50] GUO F F, SHEN Y Y. LEO satellite localization of receiver in motion using signal frequency of arrival[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2569(1): 012066.
- [51] SHI C, ZHANG Y L, LI Z. Revisiting Doppler positioning performance with LEO satellites[J]. GPS Solutions, 2023, 27(3): 126.
- [52] North American Aerospace Defense Command (NORAD), Two-

line element sets[EB]. [2024-09-30].

- [53] KOZHAYA S E, HAIDAR-AHMAD J A, ABDALLAH A A, et al. Comparison of neural network architectures for simultaneous tracking and navigation with LEO satellites[C]//Proceedings of the ION GNSS+, The International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Institute of Navigation, 2021: 2507-2520.
- [54] LI D B, LIU X Y, YIN Z S, et al. CWGAN-based channel modeling of convolutional autoencoder-aided SCMA for satellite-terrestrial communication[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(22): 36775-36785.
- [55] NEINAVAIE M, KASSAS Z M. Cognitive sensing and navigation with unknown OFDM signals with application to terrestrial 5G and starlink LEO satellites[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2024, 42(1): 146-160.
- [56] 张兆维, 刘琳, 刘慧, 等. 空间通信载波多普勒频偏捕获的两阶段稀疏算法[J]. 物联网学报, 2024, 8(2): 36-45.
ZHANG Z W, LIU L, LIU H, et al. Two-stage-sparse algorithm for carrier Doppler-shift acquisition in space communications[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2024, 8(2): 36-45.
- [57] IANNUCCI P A, HUMPHREYS T E. Fused low-earth-orbit GNSS[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024, 60(4): 3730-3749.

[作者简介]



刘翔宇(1994—), 女, 哈尔滨工业大学航天学院博士生, 主要研究方向为低轨道卫星辅助定位。



李东博(1989—), 男, 博士, 哈尔滨工业大学计算学部副教授, 主要研究方向为空地一体化网络、卫星通信与导航、AIoT、移动边缘计算。



刘劫(1972—), 男, 博士, 哈尔滨工业大学讲席教授, 智慧农场技术与系统国家重点实验室主任, 国家高层次人才, IEEE Fellow、ACM杰出科学家、ACM SIGBED China 主席。主要研究方向为物联网系统、移动计算与人工智能。