



低轨导航增强技术发展综述

李 敏¹ 黄腾达¹ 李文文¹ 赵齐乐¹

¹ 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

Overview of Low Earth Orbit (LEO) Navigation Augmentation Technology

LI Min¹ HUANG Tengda¹ LI Wenwen¹ ZHAO Qile¹

¹ GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

摘 要:低轨卫星是对中高轨GNSS卫星的重要补充,能够增强GNSS系统的精度、可靠性、完好性和可用性。随着近年来低轨星座的建设,低轨导航增强技术已经成为当前导航定位领域发展的重要方向。本文对低轨导航增强技术的现状和发展进行总结和梳理,讨论并分析了低轨导航增强技术的发展和应用需要解决的关键问题及其带来的发展机遇。

关键词:低轨导航增强;全球导航定位系统;星基增强;联合定轨

中图分类号:P228;TN967

文献标志码:A

Abstract: Low earth orbit (LEO) satellites are important complements to current GNSS constellations mainly comprising medium and geostationary satellites. The accuracy, reliability, integrity and availability of GNSS systems can be significantly enhanced with dedicated LEO constellation. Due to the rapid development of LEO constellations in recent years, LEO navigation augmentation technology has become an important direction of development in the current navigation and positioning field. This paper summarizes the current research status and development of LEO navigation augmentation tech-

引用格式: 李敏,黄腾达,李文文,等. 低轨导航增强技术发展综述[J]. 测绘地理信息,2024,49(1):10-19(LI Min,HUANG Tengda,LI Wenwen,et al. Overview of Low Earth Orbit (LEO) Navigation Augmentation Technology[J]. Journal of Geomatics,2024,49(1):10-19)

基金项目:国家自然科学基金(42004020,42030109,42204019);中国博士后科学基金(2021M692460)。

nology, discusses and analyzes some key issues that need to be solved for the development and application of LEO navigation augmentation technology and the opportunities it brings.

Key words: low earth orbit (LEO) navigation augmentation; GNSS; satellite-based augmentation; combined precise orbit determination

全球卫星导航定位系统(global navigation satellite system, GNSS)作为重要的时空基础设施,能够为全球用户提供全天候、全时段、高精度的导航、定位和授时(positioning navigation timing, PNT)服务,对国民经济和军事国防意义重大^[1]。过去的几十年间,GNSS系统发展迅速,在国际上已经形成了美国GPS、俄罗斯GLONASS、欧洲Galileo、中国BDS四大GNSS系统以及日本QZSS、印度IRNSS两大区域增强系统的格局。

为了提高GNSS系统的精度、可用性和完好性,各国GNSS系统也在陆续进行更新换代:美国GPS的第五代BLOCK III导航卫星支持更多的频率、更强的信号以及更长的使用寿命;俄罗斯新一代的GLONASS-K卫星在支持频分多址的基础上,新增了对码分多址的支持,并计划增设倾斜地球同步轨道(inclined geo-synchronous orbit, IGSO)卫星提供区域增强服务;欧洲正在构建新一代的Kepler星座,搭载先进的光学钟和星间链路等技术;中国BDS三代建成全球星座,全球PNT服务的可用性进入新的阶段。

另一种提高GNSS系统性能的改进方法是建设和发展GNSS增强系统,以满足不同行业、不同用户对精度、完好性、收敛时间等性能指标的更高需求。按照增强方式,GNSS增强系统可以分为信息增强和信号增强两类。信息增强是指通过改正GNSS误差来提高导航定位性能的一种技术,通常是通过传输信道向用户播发修正信息或完好性信息用于修正GNSS误差,不提供距离观测。按照增强信息的传输方式,可以分为星基增强和地基增强两类。信号增强是指通过非GNSS系统的信号源发射导航信号为用户提供额外观测量的一种技术,用户可以同时接收来自导航卫星的信号和其他增强信号进行联合定位,也可以使用信号增强系统进行独立定位。

目前,GNSS增强系统提供的增强服务以信息增强为主、信号增强为辅。具有代表性的星基增强系统包括美国WAAS、中国BDSBAS、欧洲EGNOS等,并且新的星基增强系统也在不断建设和发展:日本QZSS通过L6信号提供CLAS/MADOCA增强服务,可以在日本及周边区域实现厘米级定位^[2];BDS和Galileo系统开始提供精密单点定位

(precise point positioning, PPP)服务,即北斗PPP-B2b服务和Galileo HAS服务^[3, 4],通过星基平台向用户播发状态空间域改正信息,实现了分米级到厘米级的定位精度。而CORS(continuous operational reference system)等常见地基增强系统通过向用户提供高精度差分信息进行实时动态定位(real-time kinematic, RTK),在实时高精度需求场景中大量应用。

随着传统行业的升级以及5G/6G、物联网和自动驾驶等新技术的发展,用户对精准时空信息的需求及应用场景更加复杂多样,难以通过单一的技术手段满足全部服务需求,GNSS系统面临着巨大挑战^[5, 6]。Parkinson^[7]针对GNSS系统的缺陷提出保护、优化、增强方案。杨元喜等^[5-9]倡导综合PNT和弹性PNT系统,认为低轨卫星增强技术和多源传感器信息融合技术是对天基GNSS信号的重要补充。李德仁等^[10]论证了通信、导航、遥感一体化的天基信息实时服务系统,提出建设低轨星座,与北斗系统、空天一体化网络及地面网络深度耦合,提供新一代的定位、导航、授时、遥感、通信服务。

毫无疑问,低轨导航增强技术将成为未来的卫星导航系统中不可或缺的重要部分。为此,本文对低轨导航增强技术的现状和发展进行总结和梳理,讨论并分析了低轨导航增强技术的发展和應用需要解决的关键问题及其带来的发展机遇。

1 低轨星座发展概况

目前,随着物联网、自动驾驶等新兴技术的发展,对导航定位的应用和需求日益壮大,低轨卫星凭借其独特的轨道与信号特性,逐渐走出了20世纪90年代末和21世纪初的发展低谷,国内外相关企业及机构相继开始规划和建设低轨卫星星座,国内外已部署或计划中的主要低轨卫星星座概况见表1。从表1可以看出,未来将有数以万计的低轨卫星在近地空间运行,可望成为提供PNT服务的重要基础设施。这些低轨星座主要包括全球宽带/窄带通信及导航两大主要功能,其实现导航定位服务的方式一般可以分为以下三类:第一类方法是利用低轨通信信号进行机会信号定位,这种方法无需知道卫星信号结构而是直接测量获取信号的多普勒频移等观测值,但是受限于观测几何强度和观测值精度,定位精度不高;第二类方法是通过低轨卫星播发专用的定位信号提供更高精度导航定位服务,这种方法需要用户端了解信号结构进行解码,且依赖地面系统计算低轨卫星的轨道、钟差(及增强信息),并上注卫

表1 国内外已部署或计划中的主要低轨卫星星座

Tab. 1 World's Major Deployed or Planned LEO

Satellite Constellations

星座	国家	高度/km	卫星数量
Iridium	美国	780	66
Iridium NEXT	美国	780	75
Globalstar	美国	1400	48
Starlink一代	美国	550	1 584
		540	1 584
		570	720
		560	348
		560	172
Starlink一代第二阶段	美国	335	2 493
		341	2 478
		346	2 547
		328	7 178
		334	7 178
Starlink二代	美国	345	7 178
		360	2 000
		373	1 998
		499	4 000
		604	144
波音	美国	614	324
		1 030	2 956
OneWeb	美国、英国	1 200	1 764
		1 200	2 304
GW-A59	中国	1 200	2 304
		590	480
		600	2 000
GW-2	中国	508	3 600
		1 145	1 728
		1 145	1 728
九天微星	中国	1 145	1 728
		700	720
		975	120
微厘空间	中国	1100	40
LeoSat	卢森堡	1 423	108
三星	韩国	2 000	4 700
Telesat LEO	加拿大	1 000	117
Xona PULSAR	美国	1 080	258
TrustPoint	美国	—	300+

星,或通过其他信道播发给用户;第三类方法在第二类方法的基础上更进一步,在低轨卫星上部署GNSS接收机接收上部GNSS信号,可以实现星上自主的精密轨道和钟差的测定,能够降低地面系统的计算需求。第三类方法可同时实现基于机会信号的独立导航定位服务或从信号层面增强GNSS,从而兼容前两种方式,是低轨导航增强系统理想的实现方式。

1.1 通信导航一体化星座

低轨通信星座通常包括窄带通信星座和宽带互联网星座,主要用途是提供通信或互联网服务。

其中,低轨窄带通信星座的代表为铱星系统

(Iridium)。第一代铱星系统于1998年建成,其星座包括66颗低轨卫星,均匀分布在6个近圆极轨道上^[11]。2002年,美国波音公司提出将铱星系统与GPS系统相结合的导航增强方案iGPS(high integrity GPS)^[12],并在2007年完成了iGPS抗干扰实验,并且计划第二代铱星系统(Iridium Next)播发类GPS信号和GPS增强信息提升GPS接收机在复杂环境下的性能。但是,最终在Iridium Next部署的是卫星授时和定位(satellite time and location, STL)服务^[13, 14],通过专门的信号提供PNT服务。当前,Iridium Next星座由66颗主星和9颗备份星构成,其STL服务可以为静态用户提供定位精度20 m、授时精度约50~500 ns的服务^[15, 16]。

目前,最受关注的低轨宽带互联网星座的是SpaceX公司的Starlink计划。截止到2023年5月,Starlink已经部署了4 000多颗低轨卫星,有学者利用6颗Starlink卫星的机会信号进行多普勒跟踪和定位实验,可以达到10 m的平面精度^[17]。英国与美国合作建设的OneWeb星座用于提供全球覆盖的互联网服务,已经发射了542颗低轨卫星(截止到2023年1月)。而国内互联网星座的建设现在仍处于起步阶段,中国卫星网络集团在2020年9月向国际电信联盟提交了GW-A59、GW-2两个星座的频谱申请,总计卫星数量为12 992颗,目前正在开展验证工作。低轨互联网星座通常是大型星座,地面用户往往能接受到数十甚至百来颗低轨卫星的信号,非常有利于进行机会信号定位。有学者对联合Starlink、OneWeb、Orbcomm、Iridium卫星机会信号的导航定位能力进行了测试,可以实现米级的定位精度,能够作为GNSS信号中断环境中的补充^[18, 19]。

1.2 低轨导航星座

低轨导航星座,即用作提供导航服务的低轨星座,可以播发导航信号独立提供PNT服务,也可以播发增强信息用于增强GNSS系统。

根据国务院新闻办公室的新闻发布会,在北斗三号建成的基础上,中国计划在2025年建成一个天基低轨星座系统,为世界提供厘米级定位服务。欧洲第三代卫星导航系统Kepler也将低轨卫星作为重要的组成部分,目前正处于设计阶段,计划由中轨(medium earth orbit, MEO)和低轨(low earth orbit, LEO)卫星构成,其中LEO星座包括6颗低轨卫星。Kepler系统将通过双向激光通信测距终端建立星间链路以实现精确测距和时钟同步以提高GNSS系统的性能同时减少地面系统的规模和复杂度^[20],目标是在无增强系统的情况下实现厘米级轨道精度和全

球实时 PPP^[21, 22]。

中国的多家企业或机构也正在积极开展低轨导航卫星星座的计划与布局,目前大多仍处于试验和验证阶段。2018年6月,武汉大学研制的珞珈一号科学实验卫星01星成功发射,并基于低轨卫星平台开展导航信号增强实验,其伪距和载波相位测量精度分别为2.6 m和13.0 mm,高仰角条件下分别优于1.5 m和1.7 mm,单星授时的精度在10~30 ns量级,能够与GNSS系统联合以增强实时PNT服务^[23, 24]。2018年下半年,中国航天科技集团的鸿雁星座、中国航天科工集团的虹云工程和北京未来导航科技有限公司的微厘空间均发射了各自的首颗试验卫星开展测试论证工作。鸿雁星座首发星能够播发实时轨道与钟差改正信息,导航增强实验中实时PPP能实现水平方向10 cm、垂直方向20 cm的定位精度^[25-27]。微厘空间试验星的星载GNSS接收机数据完整性在增强信号开关的情况下都可达90%以上,定轨精度为厘米级,下行增强信号的质量符合BDS接口控制文件中的要求^[28]。2019年6月,中国电子科技集团天象一号试验卫星成功发射,其主要任务是开展低轨导航增强技术体制探索试验^[29, 30],其定轨精度约为7.1 cm,下行导航信号Z1和Z2的平均多径误差分别为0.81 m和0.80 m,最大载噪比可以达到60 dB-Hz^[31]。

综上所述,发展低轨星群已成为世界各国传统航天以及商业航天领域的共识,多个低轨星座已经部署或正在规划之中,即将形成多低轨星座增强多GNSS系统的局面,为卫星通信与导航的应用和研究开拓新的方向。

2 低轨导航增强关键问题

与GNSS系统类似,低轨导航增强系统由三部分组成,包括空间部分、地面监控部分和用户部分。空间部分即低轨卫星星座,由搭载导航增强有效载荷的低轨卫星构成,向用户播发用于导航定位的导航信号以及导航增强信息;地面监控部分主要包括地面的监测和运控系统,主要任务是监测在轨卫星的运行情况,向在轨卫星下达任务指令等;用户部分主要包括能够接收卫星下行信号的终端和模块以及相应的配套设备。然而,低轨导航增强系统的实际建设面临更多挑战。

2.1 星座及信号频率设计

因为轨道高度较低,低轨卫星的星下覆盖面积仅有MEO卫星的约十分之一,需要10倍数量的低

轨卫星才能实现与GNSS相同的地面覆盖。低轨卫星需要接收GNSS信号确定自身的轨道和钟差,同时向下播发导航信号和增强信息提供导航增强服务,为了进行各颗卫星的数据同步,同轨和异轨卫星之间还需要通过星间链路进行通信。因此,低轨卫星信号频率设计和功率设计需要充分考虑信号干扰问题。

L频段是大多GNSS信号所处的频率范围,低轨导航增强信号选择L频段可以与GNSS实现最大程度的融合。然而,该频段上的信号干扰问题日益严峻,频率协商复杂,落地功率约束大,因此许多学者研究开发新的导航频段(S频段、C频段、Ka频段等)以及进一步地研究信号的复用技术^[15]。Mateu等^[32]和Sun等^[33]分别评估了伽利略和北斗的S波段信号的频率兼容性。Irsigler等^[34]从信号传播和信号跟踪以及对卫星有效载荷和接收器设计的影响方面,全面评估了将C波段频率用于导航的可行性。马福建等^[35]提出了采用连续相位调制方案实现对有限频谱的充分利用和与现有系统的频率兼容性,并提出了一种通过直接固定L+S或L+C双频无电离层模糊度来实现LEO PPP-AR的策略,仿真测试表明10 min时东北天方向的精度分别提高75.0%、62.5%、59.3%,首次固定后的固定率几乎为100%。

设计兼有通信功能的低轨星座时,往往不能仅仅考虑可见卫星数、定位可用性、几何精度衰减因子(geometric dilution of precision, GDOP)、PPP收敛时间等导航定位相关的因素,还需保证通信资源能够满足地面用户需求。Ge等^[36]分析了轨道平面数、卫星数量和倾角对低轨导航增强星座设计的影响:单一的极地星座可见卫星的分布不均匀,在中、低纬度地区的可用性比高纬度地区差;倾角在低轨星座的优化中起重要作用,通过组合不同倾角的低轨星座,可见卫星数沿纬度分布比单一倾角星座更均匀,180~240颗卫星组成的星座可以在所有纬度范围提供较稳定的GDOP,且PPP的收敛时间可以缩短到1 min以内。马福建等^[37]针对低轨导航增强星座提出了一种基于遗传算法(genetic algorithm, GA)的混合星座设计方案,对于优化的极轨道/Walker星座、正交圆轨道/Walker星座和Walker/Walker星座,星座规模为100颗时一个回归期间的平均可视卫星均大于5颗,同时全球范围都有1~3颗可视卫星保证互联网接入,并给出不同截止高度角和可视卫星数条件下所需的总卫星数。

2.2 时频基准

构建导航星座的一个关键问题是维持高稳定的时频基准,GNSS卫星保持时间同步的方案通常是搭载大型、沉重、昂贵的原子钟,然而低轨卫星在尺寸、重量、功率、成本方面的限制更大,目前只能采用小型化、低成本的钟,如芯片级原子钟和高稳晶振。因此,需要进一步探讨利用低成本的时频设备建立稳定、高精度时频基准的方法^[38]。

针对这样的问题, Van等^[39]提出了一种使用单晶振荡器、一个或多个芯片级原子钟和星载GNSS接收机的结构,可以在1 s到几天的时间内实现整体系统稳定性,系统时钟的误差标准差约为2.3~1.3 ns。Meng等^[40]提出了一个使用三阶锁频环滤波器的自动闭环频率控制系统定期补偿用户时钟的瞬时频率偏移,星载接收机上的高质量压控晶体振荡器在静态和1 070 km轨道动态的情况下,受约束的GNSS振荡器的重叠Allan偏差在1~4 000 s内都可以小于 7×10^{-12} 。武汉大学研发的珞珈一号卫星使用恒温晶体振荡器代替原子钟,在轨测试的钟稳定度^[41]约为 3×10^{-10} 。

2.3 高精度导航增强信息计算

低轨卫星高精度轨道和钟差是利用低轨增强信号进行增强PNT的前提。未来的低轨星群规模大、计算量大,地面运控系统定轨估钟需要大量的计算资源,因此需要开发高效的分布式、并行算法。考虑到低轨卫星轨道高度低、运行速度快,地面测站的观测弧段短,且低轨卫星所处的空间环境不同于中高轨GNSS卫星,低轨大气阻力和太阳光压模型不同于传统的GNSS模型。这些因素对定轨估钟的影响都需要进行全面的分析和论证,并进一步研究和精化低轨卫星的摄动模型和测量误差模型,以提高导航定位服务的精度。

为了提高地面用户定位精度并加快收敛,低轨导航增强卫星通常还需播发GNSS精密改正信息甚至完好性信息。GNSS精密改正信息必须包括精密的轨道和钟差改正数,按照带宽设计可以进一步考虑加入大气改正数及各类码偏差和相位延迟等。这些改正信息的实时性需求较高,需要分析各类改正信息参数的特性,确定各种参数的有效期和更新频率。低轨卫星过境时间短,电文上注需要在较短时间内完成,并通过星间链路进行星间同步下发。在通信、导航一体化的发展趋势下,星间链路通信需求规模将变得更加庞大,不同类型电文信息的编排模式、低中高混合星座的建设和异型轨道之间通信方

式需要进一步论证。

低轨广播星历主要包含低轨轨道和钟差信息,是地面用户利用低轨增强信号进行定位的必要条件。由于轨道不同,低轨卫星所处环境与中高轨卫星存在不可忽视的差异,其受大气阻力摄动影响较为明显,轨道力学模型表现出较为特殊的性质。因而低轨卫星星历与钟差参数的生成不能直接照搬中高轨GNSS卫星的现有方案,需要重新研究适合低轨卫星的星历参数、拟合时段和数据间隔等因素。张如伟等^[42]使用切比雪夫多项式对低轨卫星轨道进行拟合和预报,基于CHAMP卫星的拟合精度可以达到厘米级,但外推时间较短。Reid等^[43]将GPS的16参数广播星历应用于低轨卫星,拟合时长为10~20 min时精度接近GPS卫星,为确定低轨星历拟合时长提供参考。方善传等^[44]讨论了参数个数、拟合时长和数据间隔对LEO轨道拟合精度的影响,提出了一种21参数广播星历模型,并说明拟合时段20 min、数据间隔30 s是较好的选择。

图1为混合星座的观测网络^[45]示意图。

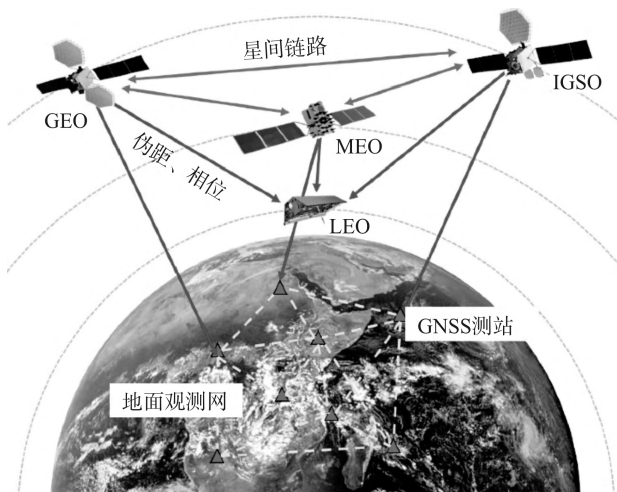


图1 混合星座的观测网络^[45]

Fig. 1 Observation Network of Mega-Constellation^[45]

2.4 完好性监测

GNSS完好性是满足金融、航空、无人驾驶等行业安全性能需求的关键问题。现有GNSS完好性监测一般依赖于地面跟踪网。与之对应,基于星基增强系统的完好性监测和卫星自主完好性监测技术可实现全球范围的GNSS完好性监测,并进一步提高故障检测能力。贾亦哲等^[46]的研究证明,当一颗卫星与其他卫星建立4条星间链路时,可以满足民用航空一类精密进近的完好性风险要求。

低轨星座的建设将促进完好性监测的发展。低

轨卫星可以接收来自上部的 GNSS 信号,也能够与其他低轨卫星、GNSS 卫星建立星间链路,形成天基监测网络,实现全时段、全方位的监测体系。蔚保国等^[29]基于天象一号提出了一种低轨导航增强监测评估指标体系,包括对星座状态、导航信号性能、导航信息性能和服务性能的监测评估,其中对于完好性的评价指标主要包括告警时间和连续性。卢广毅等^[47]分析了低轨卫星对北斗完好性性能的影响,以最小可探测偏差和故障检测率为指标,其性能分别提高了 16.5%、8%,BDS 单颗卫星满足空间信号精度要求。另一方面,低轨卫星的增强也将提升用户端完好性监测性能。王利等^[48]研究证明,高轨道倾角、中轨道倾角和混合轨道倾角的低轨星座增强下非精密进近阶段的接收机自主完好性可用性较 BDS 分别提升 30.5%、29.0% 和 41.0%,并且可检测到的最小偏差显著减小。

2.5 用户设备与算法适配

低轨卫星轨道低、运动速度快,卫星导航信号的视线方向的多普勒与加速度变化范围都远大于中高轨卫星,为保证正常同步接收 GNSS 和低轨增强信号,地面用户部分的硬件设备和算法也应该进行更新。地面接收机的设计需要关注高动态导航信号的捕获问题,相应的射频、模数转换、基带信号处理、捕获、跟踪、解调等都需要做出针对性适配。而对于导航定位算法,需要特别注意对质量控制算法尤其是传统的周跳探测算法的改进,并且对低轨卫星可能引入的特殊偏差进行分析和建模^[49]。

此外,应该大力发展低成本导航设备的研发与算法适配,尤其是目前已经有广泛基础的以智能手机为代表的大众移动终端,才能真正实现全民应用。

3 低轨导航增强发展机遇

与传统的中高轨 GNSS 星座相比,低轨星座具有轨道高度低、信号强度高、几何构型变化快等特点,这也为提升 GNSS 精密定轨、增强 PPP 定位以及电离层和对流层反演等多个方面带来了新的机遇。

3.1 联合定轨

低轨星载接收机可作为天基跟踪站弥补地面观测站分布不均匀的问题,提高 GNSS 定轨精度。研究显示只需要 2~3 颗低轨卫星参与联合定轨即可显著改善 GNSS 卫星的轨道精度^[50-53]。杨宇飞等^[54]分析了 GRACE-A、GRACE-B、FY3C 低轨卫星对导航卫星轨道测定的增强作用,这 3 颗低轨卫星可以

显著增强北斗和 GPS 导航卫星的可见性和定轨观测几何结构,GPS 卫星轨道的外符合精度提高 29.1%;北斗 GEO、IGSO、MEO 卫星轨道重叠弧段精度分别提高了 74.8%、70.3%、66%。然而对于大规模低轨星座与 GNSS 星座联合定轨需要进一步考虑计算效率问题,有学者提出了适用于大型低轨星座与 GNSS 星座联合定轨的方案,即优选部分低轨卫星的星载 GNSS 数据,与低轨卫星和 GNSS 卫星的导航数据联合定轨,确定其精密轨道和钟差,再使用常规方法解算其它低轨卫星的轨道和钟差,仿真实验表明用户测距精度可以达到厘米级^[55]。除了引入低轨卫星星载接收机的 GNSS 观测数据,也可以直接建立星间链路,现在北斗三号卫星已经能够通过 Ka 波段信号双向观测获得星间距离观测,大幅提升导航卫星定轨精度^[56-58]。

随着未来大规模低轨星座的建成,星间链路将会提供更多的观测数据,进一步优化几何构型,从而提升联合定轨精度,能够为相关产业提供更高精度的时空基准。

3.2 PPP 快速收敛

PPP 技术可以通过单个接收机获取高精度位置信息。然而,中高轨 GNSS 卫星的几何图形结构变化较慢,导致 PPP 参数历元间耦合较强,短时间内无法有效区分不同参数,所以 PPP 定位需要时间进行收敛。低轨卫星的运行速度快,星座几何图形结构变化快,可以有效降低历元间观测值的相关性,从而加速 PPP 收敛,因此通过低轨卫星导航增强技术将有望将 PPP 更广泛地应用到实时高精度需求场景中。

目前,很多学者已经开展了低轨导航增强 PPP 相关的研究。高为广等^[59]研究表明,北斗联合 150 颗低轨卫星全球 PPP 服务的精度为平面 5 cm、高程 10 cm,收敛时间约 1 min,部分测站的收敛速度能够提升 20 倍以上。李星星等^[60]基于仿真数据比较和分析了 66、96、192、288 颗低轨卫星对 GPS、BDS 以及多系统 PPP 的增强效果,加入低轨卫星后 PPP 浮点解的收敛时间可从单系统的半小时降低到数分钟,在观测条件较好时可以达到 1 min 以内。李昕等^[61]研究了不同低轨星座增强后的 PPP-AR 的性能,并分析了 LEO 的三频观测对模糊度解算的贡献,引入 60、192 和 288 颗 LEO 卫星的观测,首次固定时间可以从 7.1 min 缩短到 4.8 min、1.1 min 和 0.7 min,定位精度分别提高了 60%、80% 和 90%;在仅使用 288 颗低轨卫星的 LEO-PPP 测试中,三频 PPP-AR 首次固定时间约为 55.2 s,1 min 时的东、

北、天方向定位精度分别约为 1.69 m、0.75 m、4.16 m,与双频 PPP-AR 相比,收敛时间缩短约 23.1%,定位精度分别提高 50.2%、56.8%、17.2%。邓志旭等^[62]进一步分析了低轨卫星对北斗 PPP-RTK 的有益作用,在 192 颗低轨卫星的增强下,部署间距约为 180 km 地面参考网,低轨增强北斗 PPP-RTK 性能可达瞬时厘米级,将间距扩大至 500 km 后仍可在 10 s 左右收敛。

总体而言,低轨导航增强技术可以帮助 PPP 解决收敛缓慢的问题,在不依靠密集地面参考站网络的情况下,实现实时高精度的定位,在物联网、自动驾驶等新兴的位置信息依赖的产业有很好的应用前景。

图 2 为低轨增强 PPP 浮点解的平均收敛时间^[60]示意图。

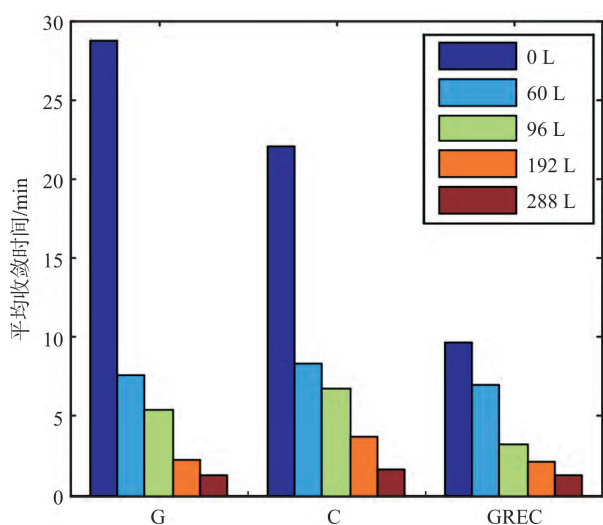


图 2 低轨增强 PPP 浮点解的平均收敛时间^[60]

Fig. 2 Average Convergence Time of LEO-Augmented PPP Float Solutions^[60]

3.3 电离层及对流层大气反演

对流层延迟和电离层延迟是 GNSS 观测模型中重要的误差源。对流层延迟随对流层折射率而变,其折射率取决于当地的温度、压力和相对湿度,而电离层延迟反映了 GNSS 信号传播路径上的总电子含量。因此,地面监测站的 GNSS 观测数据可用于大气反演,建立对流层延迟模型和全球电离层模型(global ionosphere model, GIM)。低轨卫星的运行不受地面条件的影响,而且不同倾角轨道上的低轨卫星可以实现对地球表面不同区域的覆盖,有利于解决全球监测站分布不均匀的问题。而且,低轨卫星可以接收来自上部的中高轨 GNSS 的信号,也可以向地面播发下行导航信号,同时对其上部和下部

的电离层进行监测,这有助于研究电离层的分层结构。

任晓东等^[63,64]使用 800 km 轨道高度上多个低轨卫星的双频 GPS 观测值建立 GIM 模型,精度提升约 24%。进一步结合 GNSS 和 LEO 观测数据进行电离层建模,相较于仅使用地面监测站 GNSS 数据获得的 GIM 精度可以提高 21%~25%。Zhang 等^[65]基于仿真数据对低轨增强天顶对流层延迟和梯度估计进行了相关研究。与单 GNSS 解相比,LEO 增强 GNSS 的天顶对流层延迟、北方向梯度和东方向梯度的精度分别提高 15.7%、29.6% 和 16.4%;在对流层参数快速变化时期,随着 ZTD 和水平梯度的时间分辨率的提高,低轨星座的贡献变得更大。这证明低轨增强 GNSS 是改善对流层估计性能的一个重要工具,并将促进 GNSS 在水汽监测方面的应用。

随着未来低轨星群的建设,大量的低轨卫星将密集部署在不同倾角的轨道上,将实现对地球表面的无缝覆盖。届时,大气模型的精度将进一步提高,对大气的全时段、全方位的监测也将成为可能。

3.4 地球参考框架确定

地球参考框架(terrestrial reference frame, TRF)目前通过 GNSS、SLR、VLBI 和 DORIS 四种空间大地测量技术组合确定,每种技术都有特殊的优点和缺点,它们对 TRF 定义参数的敏感性和适用性不同。由于系统设计的限制,当前的 GNSS 系统没有对 ITRF2014 原点和尺度的实现做出贡献,未来低轨卫星的加入有望解决这样的问题。

Männel 等^[66]分析了低轨卫星对地心坐标估计的影响,使用 53 个全球分布的 IGS 测站及四颗低轨卫星 (GRACE-A、GRACE-B、OSTM/Jason-2、GOCE) 的数据进行处理,加入一颗低轨卫星就可以减少 20% 的形式误差,加入四颗低轨卫星后可以显著减少低轨相关的特征。Kuang 等^[67]使用 GRACE 卫星的 GPS 和加速度计数据,通过单个 LEO 卫星的精密定轨来估计地心运动,结果证明 GRACE 卫星的 GPS 观测数据对地心运动具有高度灵敏性,且可以通过加速度计获得高精度的力学模型。Glaser 等^[22]通过仿真对基于未来 Kepler 星座的参考系统原点和尺度实现进行了详尽的研究。低轨卫星和星间链路技术的加入,能够极大程度提高估计精度。与仅有 MEO 的星座相比,地心坐标 Z 方向的精度提高了 43 倍, X 和 Y 方向提高了 8 倍,尺度估计的精度可以提高 34%。此外,地球自转参数(ERP)的估计精度也能得到明显提升,其中 x_p 、 y_p 、UT1-UTC 的精度分别提升 63%、64%、85%。

总的来说,得益于更全面的轨道覆盖,低轨卫星的加入非常有益于 TRF 的测定,特别是对地心坐标和尺度的估计。未来更多低轨卫星部署到近地空间后,有望进一步提高 TRF 的精度。

4 结束语

在世界各国相关机构和组织的规划中,未来将发射数以万计的低轨卫星包括 GNSS 增强星座,构建庞大的低轨星群,这为导航定位技术的发展带来了很大的机遇。低轨星座信号强度高,几何构型变化快,能够为地面用户提供全时段、全区域的导航增强服务,提高 GNSS 系统的精度、可靠性、完好性和可用性,全面提升 GNSS 系统的导航定位服务能力,有望解决 GNSS 初始化时间长、易受干扰、可靠性差等问题,在未来物联网、自动驾驶等需要高精度时空信息的领域有很好的应用前景。

当然,低轨导航增强技术目前仍有需要解决的关键问题需要研究和突破,在星座规划^[68]、地面运控^[69]、用户终端、误差建模等方面需要进行深入、详尽的研究和论证,为低轨导航增强技术的实现奠定坚实基础。

随着未来低轨星座的发展,以及国家综合 PNT 体系的建设,覆盖空、天、地、海的泛在通信和导航系统将深刻影响社会的生产和生活,导航定位领域应该抓住发展机遇,在联合定轨、PPP 快速收敛、全球大气监测、地球参考框架确定等技术领域进一步发展,并且更要推进通信、导航一体化的发展和建设,联合惯性导航、激光雷达、视觉等多源、泛在的传感器^[70-71],实现全面可用的导航定位服务,为相关行业提供广泛、可用的高精度时空信息。

参考文献

- [1] 宁津生,姚宜斌,张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报, 2013, 1(1): 3-8
- [2] Namie H, Kubo N. Performance Evaluation of Centimeter-Level Augmentation Positioning L6-CLAS/MADOCA at the Beginning of Official Operation of QZSS [J]. IEEE Journal of Industry Applications, 2021, 10(1): 27-35
- [3] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统公开服务性能规范(3.0版)[EB/OL]. [2023-06-14]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfzx/202105/P020210526215541444683.pdf>
- [4] European Global Navigation Satellite Agency. Galileo High Accuracy Service (HAS)[EB/OL]. [2023-06-14]. <https://www.gsc-europa.eu/galileo/services/galileo-high-accuracy-service-has>
- [5] 杨元喜. 综合 PNT 体系及其关键技术[J]. 测绘学报, 2016, 45(5): 505-515
- [6] 杨元喜. 弹性 PNT 基本框架[J]. 测绘学报, 2018, 47(7): 893-901
- [7] Parkinson B. Assured PNT for Our Future: PTA. Actions Necessary to Reduce Vulnerability and Ensure Availability [J]. GPS World, 2014, 14(9): 1-10
- [8] 杨元喜, 李晓燕. 微 PNT 与综合 PNT [J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1249-1303
- [9] 杨元喜, 任夏, 贾小林, 等. 以北斗系统为核心的国家安全 PNT 体系发展趋势[J]. 中国科学:地球科学, 2023, 53(5): 917-944
- [10] 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): 1501-1506
- [11] Fossa C E, Raines R A, Gunsch G H, et al. An Overview of the IRIDIUM (R) Low Earth Orbit (LEO) Satellite System [C]. Proceedings of the IEEE 1998 National Aerospace and Electronics Conference NAECON 1998 Celebrating 50 Years (Cat No98CH36185), Dayton, OH, USA, 1998
- [12] Joerger M, Gratton L, Pervan B, et al. Analysis of Iridium-Augmented GPS for Floating Carrier Phase Positioning [J]. Navigation, 2010, 57(2): 137-160
- [13] Gutt G, Lawrence D, Cobb S, et al. Recent PNT Improvements and Test Results Based on Low Earth Orbit Satellites [C]. Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Reston, Virginia, 2018
- [14] Kbdy G, Adamski G, May N. Design Concepts and Challenges for the Iridium Next Command and Control System [C]. 2018 SpaceOps Conference, Reston, Virginia, 2018
- [15] 蒙艳松, 严涛, 边朗, 等. 基于低轨互联网星座的全球导航增强——机遇与挑战[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(1): 12-24
- [16] 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
- [17] 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): 2606-2616
- [18] Kassas Z M, Kozhaya S, Kanj H, et al. Navigation with Multi-constellation LEO Satellite Signals of Opportunity: Starlink, OneWeb, Orbcomm, and Iridium [C]. 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, CA, USA, 2023
- [19] Kozhaya S, Kanj H, Kassas Z M. Multi-constellation Blind Beacon Estimation, Doppler Tracking, and Op-

- portunistic Positioning with OneWeb, Starlink, Iridium NEXT, and Orbcomm LEO Satellites [C]. 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, CA, USA, 2023
- [20] Schmidt T D, Schuldt T, Michalak G, et al. Optical Technologies for Future Global Navigation Satellite Systems[C]. 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, CA, USA, 2023
- [21] Günther C. Kepler - Satellite Navigation Without Clocks and Ground Infrastructure[C]. Proceedings of the 31st International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018), Miami, Florida, 2018
- [22] Glaser S, Michalak G, Männel B, et al. Reference System Origin and Scale Realization Within the Future GNSS Constellation “Kepler” [J]. Journal of Geodesy, 2020, 94(12): 117
- [23] 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
- [24] 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): 2 191-2 196
- [25] 赵聪. “鸿雁”星座首颗试验卫星发射 [J]. 中国航天, 2019(1): 45-46
- [26] 蒙艳松, 边朗, 王瑛, 等. 基于“鸿雁”星座的全球导航增强系统 [J]. 国际太空, 2018(10): 20-27
- [27] 田野, 边朗, 张立新. 基于鸿雁星座首发星的导航信息增强系统[C]. 第十一届中国卫星导航年会, 成都, 2020
- [28] Chen L, Lv F, Yang Q, et al. Performance Evaluation of CentiSpace Navigation Augmentation Experiment Satellites [J]. Sensors, 2023, 23(12): 5704
- [29] 蔚保国, 武子谦, 伍蔡伦, 等. 天象一号低轨导航增强系统研究与在轨试验验证 [J]. 导航定位与授时, 2022, 9(1): 25-34
- [30] 伍蔡伦, 树玉泉, 王刚, 等. 天象一号导航增强信号设计与性能评估 [J]. 无线电工程, 2020, 50(9): 748-753
- [31] Wu Z, Yu B, Sheng C, et al. In-Flight Performance Analysis of the Navigation Augmentation Payload on LEO Communication Satellite: A Preliminary Study on WT01 Mission [J]. Geo-spatial Information Science, 2022, 25(1): 88-103
- [32] Mateu I, Boulanger C, Issler J L, et al. Exploration of Possible GNSS Signals in S-Band[C]. Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2009), Savannah, GA, 2009
- [33] Sun Y, Xue R, Zhao D, et al. Radio Frequency Compatibility Evaluation of S Band Navigation Signals for Future BeiDou [J]. Sensors, 2017, 17(5): 1039
- [34] Irsigler M, Hein G W, Schmitz-Peiffer A. Use of C-Band Frequencies for Satellite Navigation: Benefits and Drawbacks [J]. GPS Solutions, 2004, 8: 119-139
- [35] Ma F, Zhang X, Hu J, et al. Frequency Design of LEO-Based Navigation Augmentation Signals for Dual-Band Ionospheric-Free Ambiguity Resolution [J]. GPS Solutions, 2022, 26(2): 53
- [36] Ge H, Li B, 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
- [37] Ma F, Zhang X, Li X, et al. Hybrid Constellation Design Using a Genetic Algorithm for a LEO-Based Navigation Augmentation System [J]. GPS Solutions, 2020, 24(2): 62
- [38] 袁洪, 陈潇, 罗瑞丹, 等. 对低轨导航系统发展趋势的思考 [J]. 导航定位与授时, 2022, 9(1): 1-11
- [39] 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): 105
- [40] Meng Y, Lei W, Bian L, et al. Clock Tuning Technique for a Disciplined High Medium - Long-Stability GNSS Oscillator with Precise Clock Drifts for LEO Users [J]. GPS Solutions, 2020, 24(4): 110
- [41] 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
- [42] 张如伟, 刘根友. 低轨卫星轨道拟合及预报方法研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(4): 115-120
- [43] Reid T G R, Neish A M, Walter T F, et al. Leveraging Commercial Broadband LEO Constellations for Navigation[C]. The 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016), Portland, Oregon, 2016
- [44] 方善传, 杜兰, 周佩元, 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
- [45] 李星星, 张伟, 袁勇强, 等. GNSS卫星精密定轨综述: 现状、挑战与机遇 [J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1 271-1 293
- [46] 贾亦哲, 张立新, 边朗. 基于星间链路的卫星自主完好性监测及风险分析[C]. 第十届中国卫星导航年会, 北京, 2019
- [47] 卢广毅, 赵春梅, 邵银星. 低轨卫星增强北斗系统完好性性能分析 [J]. 测绘科学, 2021, 46(5): 8-13
- [48] 王利, 李一, 舒宝, 等. 三种典型低轨增强星座与北

- 斗系统联合应用的 RAIM 性能分析 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(5): 678-686
- [49] 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): 1 073-1 087
- [50] 匡翠林, 刘经南, 赵齐乐. 低轨卫星与 GPS 导航卫星联合定轨研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(2): 121-125
- [51] Zhu S, Reigber C, König R. Integrated Adjustment of CHAMP, GRACE, and GPS Data [J]. Journal of Geodesy, 2004, 78(1): 103-108
- [52] 耿江辉, 施闯, 赵齐乐, 等. 联合地面和星载数据精密确定 GPS 卫星轨道 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, (10): 906-909
- [53] Li X, Zhang K, Meng X, et al. LEO - BDS - GPS Integrated Precise Orbit Modeling Using FengYun-3D, FengYun-3C Onboard and Ground Observations [J]. GPS Solutions, 2020, 24(2): 48
- [54] 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
- [55] 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, 2019, 63(1): 73-93
- [56] Tang C, Hu X, Zhou S, et al. Initial Results of Centralized Autonomous Orbit Determination of the New-Generation BDS Satellites with Inter-Satellite Link Measurements [J]. Journal of Geodesy, 2018, 92(10): 1 155-1 169
- [57] 李子强, 辛洁, 郭睿, 等. 基于北斗星间链路的卫星自主导航可行性分析 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(1): 55-60
- [58] 冯来平, 毛悦, 宋小勇, 等. 低轨卫星与星间链路增强的北斗卫星联合定轨精度分析 [J]. 测绘学报, 2016, 45(S2): 109-115
- [59] 高为广, 张弓, 刘成, 等. 低轨星座导航增强能力研究与仿真 [J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2021, 51(1): 52-62
- [60] Li X, Ma F, Li X, et al. LEO Constellation-Augmented Multi-GNSS for Rapid PPP Convergence [J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(5): 749-764
- [61] Li X, Li X, Ma F, et al. Improved PPP Ambiguity Resolution with the Assistance of Multiple LEO Constellations and Signals [J]. Remote Sensing, 2019, 11(4): 408
- [62] 邓志旭, 付元辰, 李昕. 低轨增强北斗 PPP-RTK 定位方法与实验分析 [J]. 全球定位系统, 2023, 48(1): 57-63
- [63] Ren X, Chen J, Zhang X, et al. Mapping Topside Ionospheric Vertical Electron Content from Multiple LEO Satellites at Different Orbital Altitudes [J]. Journal of Geodesy, 2020, 94(9): 86
- [64] Ren X, Zhang J, Chen J, et al. Global Ionospheric Modeling Using Multi-GNSS and Upcoming LEO Constellations: Two Methods and Comparison [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-15
- [65] Zhang P, Ding W, Qu X, et al. Simulation Analysis of LEO Constellation Augmented GNSS (LeGNSS) Zenith Troposphere Delay and Gradients Estimation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 1-12
- [66] Männel B, Rothacher M. Geocenter Variations Derived from a Combined Processing of LEO- and Ground-Based GPS Observations [J]. Journal of Geodesy, 2017, 91(8): 933-944
- [67] Kuang D, Bertiger W, Desai S D, et al. Observed Geocenter Motion from Precise Orbit Determination of GRACE Satellites Using GPS Tracking and Accelerometer Data [J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(10): 1 835-1 844
- [68] 王宁远, 陈东, 刘亮, 等. 未来低轨信息网络发展与架构展望 [J]. 电子与信息学报, 2023, 45(2): 396-406
- [69] 杨学猛, 赵悦, 李娟, 等. 低轨星座系统测运控技术与管理研究 [J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 517-526
- [70] McLemore B, Psiaki M L. Navigation Using Doppler Shift from LEO Constellations and INS Data [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(5): 4 295-4 314
- [71] Wang Y, Zhao B, Zhang W, et al. Simulation Experiment and Analysis of GNSS/INS/LEO/5G Integrated Navigation Based on Federated Filtering Algorithm [J]. Sensors, 2022, 22(2): 550
- 修回日期: 2023-10-16
- 第一作者: 李敏, 博士, 教授。武汉大学 IGS 分析中心副主任, 卫星导航定位教育部重点实验室副主任。获中国青年科技奖、中国青年五四奖章, 入选国家级青年人才计划、青年测绘地理信息科技创新人才、武汉市青年科技“晨光计划”、武汉大学“珞珈青年学者”。主持北斗重大专项课题、高分重大专项课题、国家自然科学基金、湖北省自然科学基金重点项目、装备预研教育部青年人才基金等科研项目 30 余项; 参与团队重点科研与工程项目多项; 已发表 SCI 论文 50 余篇; 获国家科技进步二等奖 3 项, 省部级奖励 10 余项。现主要从事北斗/GNSS 卫星精密定轨与导航增强理论方法研究和教学等。E-mail: limin@whu.edu.cn
- 通讯作者: 李文文, 博士后。主要从事低轨卫星导航增强及精密定轨研究。E-mail: cheeselee@whu.edu.cn