

引文格式:王猛,单涛,王盾.高轨航天器 GNSS 技术发展[J].测绘学报,2020,49(9):1158-1167. DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20200170.  
WANG Meng,SHAN Tao,WANG Dun,Development of GNSS technology for high earth orbit spacecraft[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2020,49(9):1158-1167. DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20200170.

## 高轨航天器 GNSS 技术发展

王 猛<sup>1,2</sup>,单 涛<sup>1</sup>,王 盾<sup>2</sup>

1. 北京理工大学信息与电子学院,北京 100081; 2. 航天恒星科技有限公司,北京 100086

### Development of GNSS technology for high earth orbit spacecraft

WANG Meng<sup>1,2</sup>,SHAN Tao<sup>2</sup>,WANG Dun<sup>2</sup>

1. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Space Star Technology Co., Ltd., Beijing 100086, China

**Abstract:** With the increasing number of high orbit spacecraft, the use of high orbit GNSS technology to a certain extent avoids the limitations of traditional ground-based measurement and orbit determination, reduces the operation burden and maintenance cost of ground-based measurement and communication, and improves the autonomous navigation ability and orbit measurement accuracy of the satellite platform. Therefore, GNSS technology has significant research significance and application value for high earth orbit spacecraft. In this paper, the technology development of GNSS used in high orbit spacecraft is reviewed. Compared with low orbit spacecraft, the characteristics of GNSS in high orbit space are analyzed. From the three aspects of high orbit GNSS availability, on orbit technology verification and high sensitive receiver technology, the characteristics and development of high orbit GNSS autonomous navigation technology are summarized. The new tasks of high orbit post precise orbit determination and formation satellite relative navigation are analyzed. From the perspective of the future development of high orbit spacecraft, the future research prospect of high orbit GNSS technology is given.

**Key words:** GNSS; navigation; orbit determination; high earth orbit; spacecraft; BDS

**摘 要:**随着高轨航天器任务和数量逐步增多,使用高轨 GNSS 技术在一定程度上避免了传统地面测控的局限性,降低了测控站网运行负担和维护成本,且提高了卫星平台自主导航能力和测定轨精度,具有显著的研究意义和应用价值。本文对 GNSS 用于高轨航天器的技术发展进行分析研究,对比低轨航天器,分析了 GNSS 在高轨空间环境中应用特点;从高轨 GNSS 可用性、在轨技术验证和高灵敏接收机技术 3 个方面,总结高轨 GNSS 自主导航技术特点和发展历程;分析了高轨事后精密定轨和编队卫星相对导航新任务中 GNSS 技术特点;从高轨航天器未来发展出发,给出后续高轨 GNSS 技术研究展望。

**关键词:**GNSS; 导航; 定轨; 高轨; 航天器; 北斗系统

中图分类号:P228.4; V448.2

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2020)09-1158-10

高轨航天器,如地球静止轨道(GEO)卫星、倾斜地球同步轨道(IGSO)、高偏心轨道(HEO)卫星以及月球深空探测器等,在卫星通信、预警监视、气象探测、未知天体及环境探测等领域有着重要用途。当前,高轨卫星主要依赖地面测控实现轨道确定。随着高轨航天器种类和数量日益增多,高轨对地观测载荷对高精度定轨需求逐步提高,传统地面测控系统资源日趋紧张。全球导航卫星系统(GNSS)具有全天时、全天候、全球覆盖

特点,已广泛应用于低轨道航天器,若能在高轨空间使用 GNSS 导航方式,对缓解地面测控压力、实现自主管理和提高定轨精度有着极大的帮助。

20 世纪 80 年代,在 GEO 卫星上使用 GPS 的概念已被提出<sup>[1]</sup>。2000 年,美国公布了 GPS 可操作需求文件(ORD),提出了空间服务空域(space service volume, SSV)的概念。2006 年, Bauer 正式描述了 SSV 概念,并明确卫星导航除了满足最初的 TSV(3000 km 以下)区域服务外,

在 SSV(3000~36 000 km)高轨空间也需要提供导航服务,并给出 GPS 高轨接收功率分析、覆盖性分析及可用性评估<sup>[2]</sup>。后续许多学者对 SSV 开展了大量研究工作,美国、欧洲和中国等先后研制出用于高轨空间卫星导航接收机,并开展了在轨验证试验。在全球导航卫星系统国际委员会(ICG)、美国的导航协会(ION)组织的卫星导航会议上,多次提出和倡导美国、俄罗斯、中国、日本及印度的卫星导航系统在 SSV 构架下相互兼容,并提出一系列的协议和文件来支持卫星导航在高轨空间服务应用,奠定了 GNSS 高轨应用的政策基础<sup>[3-7]</sup>。

本文首先从 GNSS 应用于高轨航天器上的技术特点出发,总结了高轨 GNSS 技术发展历程和应用,分析了国内外相关研究进展及技术验证情况,归纳出在自主导航、精密定轨、相对导航等技术方面的高轨 GNSS 研究情况,并给出了其后发展启示与建议。

## 1 高轨 GNSS 技术特点

根据 GNSS 导航系统设计初衷,导航卫星天线主瓣波束主要覆盖 3000 km 以下区域。相对于地面和低轨空间来说,高轨 GNSS 应用场景与技术特点有着很大的不同。以 GEO 轨道为例,分析得出高轨 GNSS 技术特点如下:

(1) 导航卫星几何分布差,需接收导航卫星旁瓣信号。由于 GNSS 接收机处在高于导航卫星星座的轨道上,只能收到来自地球另一侧的导航卫星所发射的导航信号,导航星几何分布差。而且,导航星发射天线主瓣波束范围约为  $23.5^\circ$  (针对 GPS L1 信号),如图 1 所示,大部分信号被地球完全遮挡,仅仅依赖主瓣信号,无法完成导航定位任务。因此,通过接收处理导航卫星旁瓣信号,来增加可用导航卫星数量和改善几何分布。根据图 2 中 GPS 导航信号接收功率表明,旁瓣信号功率会比主瓣信号功率低近 15 dB 以上<sup>[8]</sup>。

(2) 接收的 GNSS 信号功率微弱。与低轨道和地面用户相比,高轨 GNSS 与导航卫星间的距离更加遥远,是普通地面环境的 2~4 倍,自由空间路径损耗 10 dB 左右。这使得接收机接收到的旁瓣信号功率更加微弱,普通接收机难以实现捕获跟踪。即便使用高灵敏度接收处理技术,但观测噪声过大,影响定位解算精度。

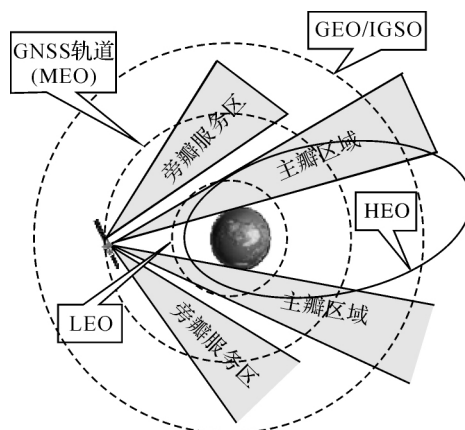


图 1 GNSS 星座和高轨航天器空间可见性

Fig.1 GNSS visibility at high earth orbit

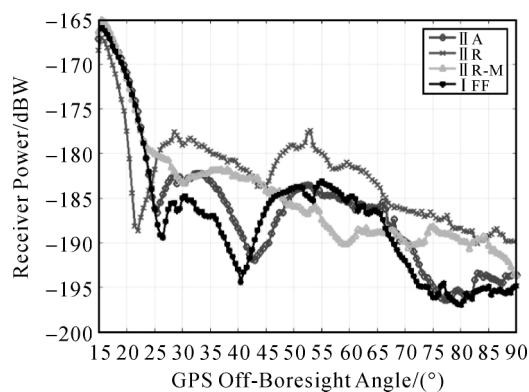


图 2 GEO 轨道上 GPS 导航信号平均接收功率<sup>[8]</sup>

Fig.2 GPS averaged received signal power at GEO orbit

(3) GNSS 信号两次穿越大气层。在接收机接收地球另一侧的导航信号,其中靠近地球边缘的导航信号两次穿越地球电离层和对流层到达接收机。电离层带来的相位延迟会带来几十米甚至百米以上的距离误差,对导航定位精度产生影响<sup>[9]</sup>。但这种高轨 GNSS“掩星”信号探测,为在高轨空间的电离层和对流层探测提供了有利条件。

(4) GNSS 接收机空间环境适应性。地面或低轨卫星的导航接收天线指向天顶方向,高轨 GNSS 接收天线通常指向地球方向,波束宽度通常小于低轨卫星波束,但天线波束内增益要求高。高轨航天器受火箭推进资源限制,在体积、重量方面可分配给在 GNSS 接收机的资源有限,且还要求接收机具备高灵敏度接收和高轨空间辐照环境适应能力。

另外,对于 HEO 或者地球同步转移轨道(GTO)轨道航天器来说,GNSS 接收机在高轨和

低轨之间往返飞行,多次穿过导航卫星轨道面。此时接收机既要在高轨上接收来自地球对面的卫星导航信号,还能在低轨道上接收天顶方向导航信号,在高低轨道转移飞行过程中还要兼顾对天和对地两个方向的信号接收,此时接收信号功率大范围变化和强弱信号混叠现象的出现,对GNSS接收机系统设计带来复杂性。

## 2 高轨 GNSS 自主导航技术发展

随着航天技术的发展和高轨卫星的数目不断增加,无论是从降低运维费用还是从提高性能角度出发,都要求卫星具有一定的自主运行能力。尤其是高轨位置保持和机动过程中,需要卫星具有自主导航和自主管理能力<sup>[10]</sup>。因此,GNSS 为高轨航天器提供实时、自主、高精度的导航服务十分必要。

### 2.1 高轨 GNSS 可用性分析

目前,对高轨 GNSS 导航可用性研究主要方法有两种:数学仿真分析和地面物理仿真验证。在可用性分析与建模过程中,考虑的参数包括:导航星座参数、飞行轨道姿态、信号发射功率,发射天线和接收天线方向图,传播损耗以及接收功率门限<sup>[10-11]</sup>。分析中考虑两个约束条件:首先要保证 GNSS 卫星和接收机之间的几何视线方向上不能被其他物体遮挡;其次还要满足接收信号强度高于捕获跟踪门限。可用性分析对象包括:可见星数、多普勒、几何分布因子、接收信号功率分布等统计特性。现有分析结果表明:在使用导航星旁瓣情况下,GNSS 用于 GEO 和 HEO 导航是可行的,导航星数满足导航解算要求,位置精度在几十米甚至更高<sup>[10-11]</sup>。近年来,导航卫星逐步向多系统兼容发展,现已涵盖了美国 GPS、俄罗斯 GLONASS、欧盟 Galileo、中国 BDS、日本 QZSS、印度 NAVIC 等导航系统,仅考虑导航星主瓣信号且接收机载噪比门限为 20 dB-Hz 时,多系统兼容高轨 GNSS 可用星数 4 颗及以上的概率也能保持在 90% 以上<sup>[4,6]</sup>。

为进一步评估高轨 GNSS 性能和轨道适应能力,通常会在地面开展物理链路模拟验证,即利用 GNSS 信号模拟器模拟卫星飞行轨迹和姿态,并根据传输信道实时生成导航信号,模拟接收机在轨环境,以此来评估接收机任务完成能力,例如在 MMS 卫星、GEOS-R 卫星、SmallGEO 任务等在研制中都进行此类地面物理测试<sup>[12-17]</sup>。

值得注意的是,导航星旁瓣信号有效全向辐射功率(EIRP)影响高轨 GNSS 整个系统性能关键因素,导航星天线受加工、安装条件影响,方向增益存在一定差异。因此,NASA 设置了专门的工组 GPS ACE 负责整理真实 GPS 旁瓣导航信号发射功率。该小组通过 GEO 卫星采集 GPS 系统导航信号,在地面通过后处理的方式评估并发布 GPS 系统的导航星天线方向图和接收功率情况,图 3 为其发布的 Block II R 导航星天线方向图<sup>[18-19]</sup>,由图可知导航星旁瓣增益在不同方向存在较大差异。

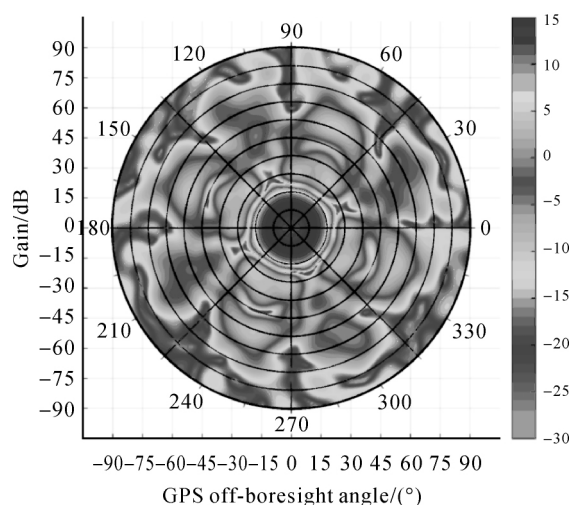


图 3 地基测量的 GPS Block II R 导航星天线方向<sup>[19]</sup>

Fig.3 GPS Block II R ground measured antenna pattern

### 2.2 高轨 GNSS 自主导航技术验证

自 20 世纪末以来,对高轨 GNSS 自主导航技术的在轨验证一直进行中,根据文献[20—33]中国内外技术验证内容,汇总了高轨 GNSS 在轨试验情况如表 1,整个历程大体分为两个阶段:

第 1 个阶段,对成熟的商业或者低轨导航接收机进行适应性改造,提高其信号接收灵敏度和高轨环境适应能力,如 TEAMSAT/YES、Equator-S、AO-40、GIOVE-A 等任务中 GPS 接收机。尽管这些任务验证了高轨 GNSS 技术可行性,但距离产品应用仍存在一定差距。

第 2 个阶段,各国均针对高轨航天器技术特点,先后开展了高灵敏度信号处理和导航解算技术研究,并研制针对高轨航天器的 GNSS 接收机,并已取得在轨实际应用。目前国外已取得验证的高轨导航接收机仅支持 GPS 导航系统,而我国则兼容 GPS、GLONASS 以及北斗方式<sup>[32]</sup>。

美国磁层多尺度任务卫星(MMS)在新一阶段任务轨道中,GSFC Navigator GPS 接收机在 17 万 km 轨道上仍可收到 GPS 信号,进一步证明了 GPS 覆盖范围可以更高,位置精度小于 60 m,速度精度小于 0.25 cm/s<sup>[34]</sup>。在静止轨道环境观测卫星 GOES-R 任务中,如图 4 所示卫星上配置的可伸出 GPS 接收天线,以保证 GPS 接收机视场内无遮挡。根据文献[33]提供的 GOES-R GPS 接收机在轨测试结果,平均可跟踪导航星数量 11 颗,平均几何分布值为 7.9,在径向、法向和切向定轨均方根误差精度分别为 7.25 m、4.39 m 和 2.47 m。在 2014 年,我国 CE-5T1 飞行试验器搭载了 GNSS 接收机并完成在轨试验,实现了 12 万 km 轨道上 GPS 信号接收,完成 50 000 km 至 5000 km 月地和地月转移轨道自主导航,导航精度优于 100 m<sup>[29-30]</sup>。在 2017 年我国 GEO 轨道通信技术试验二号星(TJS-2)任务中,完成了我国北斗导航信号兼容接收,在轨实现了 27 m、

0.03 m/s 的位置和速度精度<sup>[31-32]</sup>。

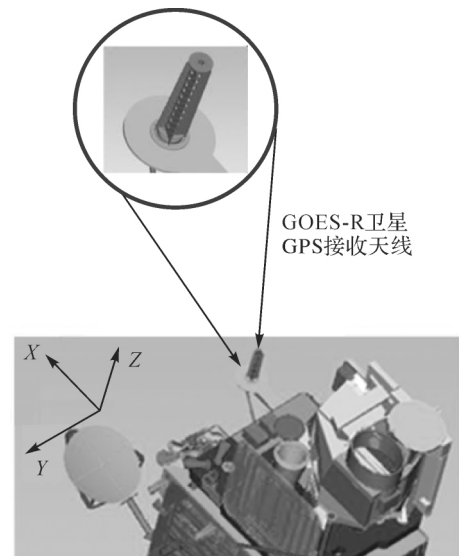


图 4 GOES-R 星上 GPS 接收天线  
Fig.4 GPS antenna on GOES-R satellite

表 1 高轨 GNSS 接收机在轨试验情况  
Tab.1 On-orbit verification of GNSS receiver at high earth orbit

任务名称	国别	时间	GNSS 接收机	高轨 GNSS 验证情况
TEAMSAT/YES	欧洲	1997-10	Trimble TANS-II	GTO 轨道,在远至 26 000 km 高度上成功跟踪 GPS 信号
Falcon Gold	美国	1997-11	NAVSYS TID-GIT	GTO 轨道,在轨收集 GPS 数据后地面处理,验证了高度 1500 ~ 33 000 km GPS 信号接收
Equator-S	美国	1997-12	Motorola Viceroy	GTO 轨道,34 000 km 高度以上成功跟踪 GPS 旁瓣信号
AO-40	美国	2000-11	Trimble TANS Vectors	HEO 轨道,获取了大量 GPS 在轨观测数据,最远可达 58 000 km 轨道,并尝试在轨导航解算
GIOVE-A	欧洲	2005-12	SGR-GEO	轨道约 23 000 km,收到多颗 GPS 信号并完成导航解算
SBIRS GEO 1	美国	2011-03	双频 GPS 接收机	GEO 轨道,完成星上实时导航及定轨,并利用 GPS L1 和 L2 双频数据对电离层延迟进行分析
MMS	美国	2015-03	GSFC Navigator	HEO 轨道,在 17 km 左右仍能接收 GPS 和定轨解算
CE-5T1	中国	2014-10	GNSS 兼容机	月-地转移轨道(约 50 000~5000 km),实现 GPS 和 GLONASS 兼容接收和导航定轨解算
TJS-2	中国	2017-01	GNSS 兼容机	GEO 轨道,实现 GPS、GLONASS 和 BDS 兼容接收和定轨解算
GOES-R	美国	2016-11	General Dynamics Viceroy-4	GEO 轨道,平均跟踪导航星数 11 颗,DOP 值 5~15 之间,位置精度优于 30 m
SmallGEO	欧洲	2017-01	Astrium Mosaic	GEO 轨道,Small GEO 平台首发星 Hispasat 36W-1,验证了 GEO 轨道 GPS 信号接收和导航定轨

2.3 高轨高灵敏度 GNSS 接收机技术

早期高轨高灵敏 GNSS 导航接收机,通常改造商用导航接收机或模块,来适应旁瓣微弱导航信号的接收处理,如 SGR-GEO 任务中 GPS 接收机是在商业 GPS 相关器芯片 GP2021 和 GP4020 基础上进行开发<sup>[26-27]</sup>。AO-40 卫星采用的是商用 Trimble 的 GPS 接收机<sup>[24-25]</sup>。美国 NASA 的

戈达德航天中心(GSFC)最开始研制的高轨 GPS 接收机 PiVoT 也是使用商业 GP2021 芯片,后来逐步自主研发了 Navigator GPS 接收机<sup>[16,36]</sup>。法国 CNES 早期也开发了 Topstar 3000 GPS 接收机最初用于 STENTOR 卫星,后来进一步升级为 Topstar 3000 G2<sup>[37]</sup>。近年来,各航天大国相继开发出适用于高轨卫星的 GNSS 导航接收机产品,

从单 GPS 系统逐步向多导航系统兼容发展,如 Viceroy、Mosaic、LION Navigator 等,部分接收机位置精度指标甚至达到 15 m 以内<sup>[38-41]</sup>,图 5 所示为一些 GNSS 接收机的实物图。随着卫星导航技术发展和芯片处理能力的提高,目前研究的星载 GNSS 接收机通过简单配置,可适用于 LEO、GTO、GEO 等不同场景,具有较强的轨道适应能力<sup>[39-41]</sup>。

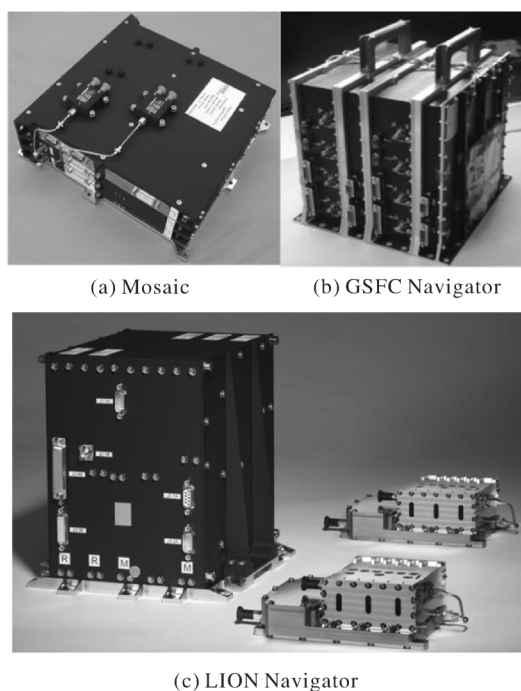


图 5 星载高轨 GNSS 导航接收机

Fig.5 GNSS receiver for high earth orbit satellite

在高灵敏度信号捕获技术方面,通常采用长时间的相干和非相干累积来提高信号处理增益。文献[16]给出了 GSFC Navigator GPS 接收机的基于 FFT 循环相关的弱信号捕获方法,算法实现流程如图 6 所示。仿真分析结果表明,该捕获算法可完成载波比 25 dB-Hz 微弱导航信号的快速捕获,实际在轨应用也达到了预期效果。为提高捕获处理效率和降低处理器资源,提出了一种基于梳状滤波器(comb filters)架构的高灵敏度信号捕获方法,在伪码搜索前通过 comb 滤波器完成相干积分<sup>[42]</sup>,在 CE-5T1 和 TJS-2 任务中的高轨 GNSS 接收机使用此方法<sup>[30]</sup>。近年来,有学者根据导航信号自相关峰值在时域上的稀疏特性,提出了利用稀疏傅里叶(SFT)实现 GPS 信号捕获方法,可有效提高捕获性能和运算效率<sup>[43]</sup>。

在高灵敏度信号跟踪技术方面,现有的主要

技术手段主要借助于传统锁相环(PLL)和锁频环(FLL)跟踪弱信号跟踪能力。文献[44]介绍了使用卡尔曼滤波器(KF)高灵敏环路处理,建立载波多普勒相位、频移和频率变化率的状态和测量方程模型,来实现微弱信号载波跟踪。不同于传统标量处理方式,采用矢量跟踪环路技术,用于联合跟踪多个频率上所有卫星的载波相位,可进一步提高跟踪灵敏度<sup>[45]</sup>。近年来,文献[46]在利用动力学模型和 GNSS 观测量实现高轨定轨滤波基础上,使用轨道滤波结果辅助跟踪环路,来提升灵敏度,仿真结果表明,跟踪灵敏度可以达到 11 dB-Hz。后续可针对轨道动力学信息的矢量跟踪环路开展研究工作,进一步提高跟踪灵敏度。

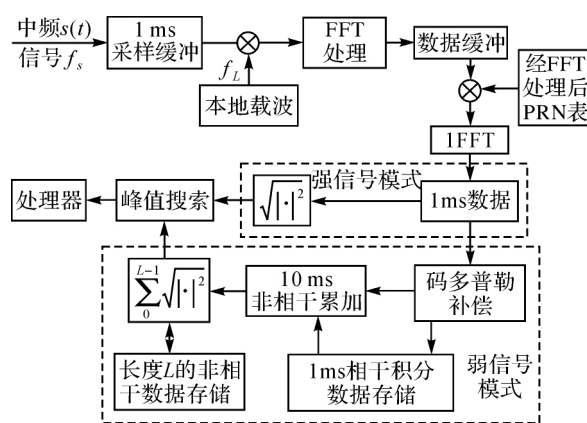


图 6 基于 FFT 的强弱信号快速捕获模块

Fig.6 FFT-based correlation and strong or weak signal component of the quick acquisition

在导航定位定轨技术方面,高轨 GNSS 接收机除了采用传统最小二乘法的几何定位外,还使用 GNSS 观测量与轨道动力学融合滤波的定轨解算方法,进一步提高位置和速度测量精度。在高轨 GNSS 定轨方法中,通常采用扩展卡尔曼滤波器(EKF)方法,完成轨道动力学模型的线性化处理,实时获得卫星运动状态的最优估计。其中,将接收机位置、速度、钟差、钟速以及其他模型参数作为待估计状态量,将导航星伪距信息作为观测量,使用几何定位结果完成滤波器初始化,定轨滤波算法实现如图 7 所示<sup>[47]</sup>。

### 3 高轨 GNSS 事后精密定轨技术

利用星载 GNSS 确定卫星精密轨道已在我国低轨卫星上成功应用,可达到厘米级甚至亚厘米级定轨精度<sup>[48-49]</sup>。在高轨 GNSS 精密定轨技术研究中,利用通信技术试验二号星(TJS-2)高

轨导航接收机的 GPS 观测数据,武汉大学研究人员进行了精密定轨数据处理和精度评估。观测量使用策略采用伪距与载波加权处理的方式,定轨结果见表 2,3 天弧长定轨重叠弧段精度可达到米级以内<sup>[31]</sup>。

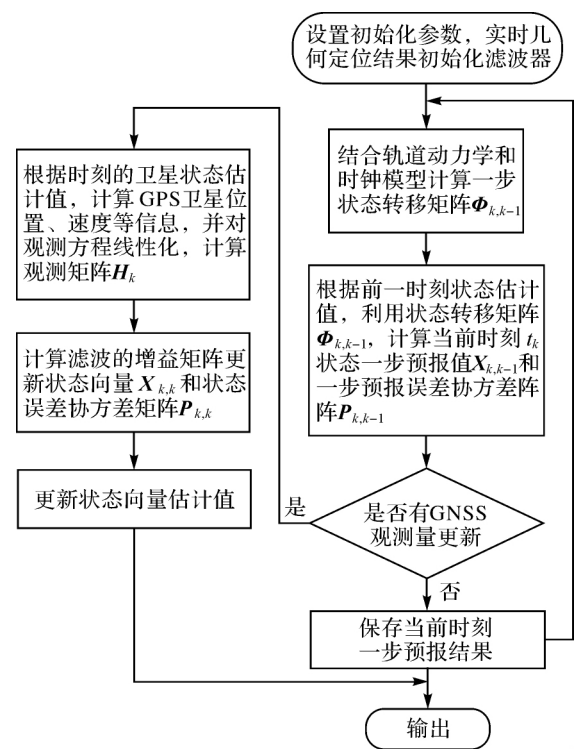


图 7 高轨航天器 GNSS 定轨算法流程

Fig.7 GNSS-based orbit determination method for high earth orbit spacecraft

表 2 重叠弧段在切向(A)、法向(C)、径向(R)和三维(3D)RMS 统计值

Tab.2 RMS statistics of along(A), cross(C), and radial(R) for overlap arc

时长	权重比	A/m	C/m	R/m	3D/m
30 h	3 : 0.02	1.91	0.78	0.95	2.27
	3 : 0.3	1.15	0.77	0.69	1.55
	3 : 3	1.25	1.10	2.18	2.75
3D	3 : 0.02	1.47	0.36	0.52	1.60
	3 : 0.3	0.70	0.28	0.27	0.80
	3 : 3	0.50	0.33	0.24	0.64

影响高轨 GNSS 精密定轨精度的误差源主要有两类: 首先, 导航星几何分布不好, 信号功率弱带来的观测量误差大, 影响了事后精密定轨精度<sup>[33,50]</sup>; 其次, 对于高轨卫星来说, 不受大气阻力摄动影响, 地球非球形引力摄动也不敏感, 对量级较高的地球非球形摄动和日月摄动都有相对成熟

且精度较高的模型进行模制改正, 太阳光压摄动成为继地球引力、日月引力之后量级最大摄动。以导航卫星为例, 太阳光压摄动量影响在非保守摄动力影响中占比最大, 达 90% 以上<sup>[51-52]</sup>。因此, 后续可研究如何减少太阳光压摄动模型误差影响、提高 GNSS 观测量质量以及探索如何使用载波数据来改善定轨精度。一些研究人员尝试使用静电悬浮加速度计实现光压微弱力测量, 以改善光压长周期项对定轨精度影响。

4 高轨 GNSS 相对导航技术

高轨航天器编队飞行和协同工作, 彼此之间的高精度相对时空信息统一与协同非常重要。相对时空信息通常指的是相对位置、相对速度、相对姿态和相对时间。采用 GNSS 差分处理方法, 通过共视导航星测量信息构建差分组合, 消除或降低导航测量值中的公共误差部分来提高精度。此法已广泛的应用低轨卫星编队中, 甚至使用 GNSS 来引导两飞行器交会对接<sup>[53]</sup>。在高轨航天器实现 GNSS 相对导航技术, 需要关注如下几个问题:

(1) 无论是载波相位差分还是伪距差分, 前提条件是存在共视星, 通常高轨编队卫星星间基线长度大于低轨星间基线, 甚至达到数千公里量级, 在共视星数量、共视时间、观测量相关性等方面需开展针对性研究。

(2) 由于高轨接收导航信号功率微弱, 载波跟踪稳定性差, 载波周跳频繁, 需针对传统载波模糊度固定方法的可用性和收敛时间开展研究工作。在载波差分方法不可用时, 可采用伪距差分结合轨道动力学信息辅助滤波的方法实现高精度相对导航<sup>[54-56]</sup>。

(3) 低轨编队卫星星间时差测量通常接收机收到共视星后, 将某颗共视星观测数据求取单差(单差法), 以获得准确的星间时差信息。另外, 文献<sup>[54]</sup>进行相对基线求解时, 也将星间时差、时差变化量作为状态信息量, 结合动力学模型完成定轨滤波更新。

5 高轨 GNSS 技术展望

GNSS 高轨航天器中自主导航、精密定轨和相对导航等方面已取得了一定的技术研究成果。随着北斗全球化进程逐步完善, 开展高轨北斗在高轨中应用研究非常重要。北斗在 B1C 和 B2a

两种新信号体制上采用了“数据支路+导频支路”体制,有助于提高接收灵敏度和跟踪精度,多体制 LDPC 编码也提高了弱信号解调性能<sup>[57]</sup>,更易于实现高轨高灵敏度处理。并且,北斗系统采用 MEO、GEO 和 IGSO 混合星座方式,当接收机处于中国区域上空的 GEO/IGSO 轨道时,既可接收来自地球对面导航卫星发射天线旁瓣信号,又可使用北斗 GEO/IGSO 同轨道面导航信号。而且,这两类信号在接收视线上差异较大,利用水平面方向的同轨导航信号参与定位,除了明显改善星座几何分布外,可直接避免了来自地球方向的干扰和影响。

近年来,月球探测又重新成为研究热点,一些学者对月球空间 GNSS 技术可行性开展研究工作<sup>[58-60]</sup>,并把月球任务作为 SSV 的一个典型的应用场景<sup>[6]</sup>,地月空间导航将成为现有导航服务范围的有效延伸。在此应用中,由于极差的导航星几何分布,将促进了 GNSS 与天文导航、惯性、月球空间动力学模型等多信息手段融合。而且极其微弱的信号接收功率,要求处理信号载噪比甚至达到 10 dB-Hz,使得在高灵敏度处理、快速信号捕获和电文解调方面有着极大的难度。近年来发展的低轨卫星导航增强系统,可为地面导航终端提供信号增强,以及时间和星历等信息增强,辅助提高接收灵敏度和缩短首次定位时间<sup>[61]</sup>。若在后续低轨卫星或地面站导航增强任务中,甚至在后续规划空间站、月球站及月球深空中继卫星任务,或者利用北斗星间链路,为月球 GNSS 任务提供增强服务,可有助于提高月球空间 GNSS 性能。

高轨 GNSS 会直接收到穿越地球边缘的“掩星”信号,这类信号均来自导航星主瓣信号,为电离层和大气层数据反演提供了可行性。与低轨 GNSS“掩星”探测不同,高轨探测的切点高度可达数千公里,每次持续时间几十分钟,南北极附近位置处数据居多<sup>[62]</sup>。另外,高轨卫星尤其是两万公里轨道卫星,接收机至“掩星”探测切点与导航卫星至切点的几何路径近似对称,更易于减少“掩星”数据反演中模型误差。但是,若在高轨卫星上实现高精度“掩星”探测,还需要进一步提高接收天线增益、接收灵敏度和多频观测数据精度。

## 6 结束语

随着航天技术不断发展,人类空间探测范围

逐步增大,抢占高轨空间战略资源制高点已经引起各国的格外关注。高轨 GNSS 将传统导航卫星服务区域由 3000 km 以下的低轨空间,扩展到数万公里以上的高轨空间,极大地拓展了卫星导航服务的应用范围,这也是国内外对高轨 GNSS 技术开展研究主要原因。尽管高轨 GNSS 技术并已经取得了一些的技术研究成果和应用,并在一些高轨航天器任务中发挥了重要作用,但仍有一些新技术、新需求和新应用需要进一步深入开展研究工作。另外,随着我国北斗全球导航系统建设逐步完善,积极开展北斗导航系统在高轨中应用的技术研究工作,对于提高我国高轨航天器服务能力具有非常重要的意义。

## 参考文献:

- [1] JORGENSEN P. Autonomous navigation of geosynchronous satellites using the NAVSTAR global positioning system [C]// Proceedings of National Telesystems Conference. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1982.
- [2] BAUER F H, MOREAU M C, DAHLE-MELSAETHER M E, et al. The GPS space service volume [C]// Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2006). Fort Worth: [s.n.], 2006.
- [3] BAUER F H, PARKER J J K, WELCH B, et al. Developing a robust, interoperable GNSS space service volume (SSV) for the global space user community [C]// Proceedings of the 2017 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Monterey. Monterey: [s. n.], 2017: 132-149.
- [4] PARKER J J K, BAUER F H, ASHMAN B W, et al. Development of an interoperable GNSS space service volume [C]// Proceedings of the 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Miami: [s.n.], 2018.
- [5] MILLER J J, BAUER F H, ORIA A J, et al. Achieving GNSS compatibility and interoperability to support space users [C]// Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Portland: [s.n.], 2016.
- [6] ENDERLE W, GINI F, BOOMKAMP H, et al. Space user visibility benefits of the multi-GNSS space service volume: an internationally-coordinated, global and mission-specific analysis [C]// Proceedings of the 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018). Miami: [s.n.], 2018.
- [7] JING Shuai, ZHAN Xingqun, LU Jun, et al. Characterisation of GNSS space service volume [J]. Journal of Navigation, 2019, 72(4): 500-510.

- gation, 2015, 68(1): 107-125.
- [8] PARKER J J K, VALDEZ J E, BAUER F H, et al. Use and protection of GPS sidelobe signals for enhanced navigation performance in high earth orbit[C]//Proceedings of the 39th Annual American-Astronautical-Society Rocky Mountain Section Guidance, Navigation and Control Conference. Breckenridge: [s.n.], 2016: 329-341.
  - [9] BARKER L, FREY C. GPS at GEO: a first look at GPS from SBIRS GEO1[C]//Proceedings of AAS GNC Conference. Breckenridge: [s.n.], 2012: 199-212.
  - [10] LORGA J F M, SILVA P F, DOVIS F, et al. Autonomous orbit determination for future GEO and HEO missions[C]//Proceedings of the 5th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC). Noordwijk: IEEE, 2010: 1-14.
  - [11] MARMET F X, MAUREAU J, CALAPRICE M. GPS/Galileo navigation in GTO/GEO orbit[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 117: 263-276.
  - [12] CHAPEL J, STANCLIFFE D, BEVACQUA T, et al. Guidance, navigation, and control performance for the GOES-R spacecraft[J]. *CEAS Space Journal*, 2015, 7(2): 87-104.
  - [13] LARSON K, GAYLOR D, WINKLER S. Worst-case GPS constellation for testing navigation at geosynchronous orbit for GOES-R[J]. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2013, 149: 403-416.
  - [14] LONG A, FARAHMAND M, CARPENTER R. Navigation operations for the magnetospheric multiscale mission[C]//Proceedings of the 25th International Symposium on Space Flight Dynamics. Munich: NASA Goddard Space Flight Center, 2015.
  - [15] ZENTGRAF P, BERGE S, CHASSET C, et al. Preparing the GPS experiment for the small-geo mission[C]//Proceedings of the 33rd Annual AAS Guidance and Control Conference. Breckenridge, CO: [s.n.], 2010.
  - [16] WINTERNITZ L M B, BAMFORD W A, HECKLER G W. A GPS receiver for high-altitude satellite navigation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2009, 3(4): 541-556.
  - [17] BAMFORD W, NAASZ B, MOREAU M C. Navigation performance in high earth orbits using navigator GPS receiver[C]//Proceedings of the 29th Annual AAS Guidance and Control Conference. Breckenridge, CO: AAS, 2006.
  - [18] MARTZEN P D, HIGHSMITH D E, VALDEZ J E, et al. GPS antenna characterization experiment (ACE): receiver design and initial results[C]//Proceedings of the Institute of Navigation Joint Navigation Conference. 2015.
  - [19] DONALDSON J E, PARKER J J K, MOREAU M C, et al. Characterization of on-orbit GPS transmit antenna patterns for space users[C]//Proceedings of the 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Miami, Florida: [s.n.], 2018.
  - [20] BALBACH O, EISSFELLER B, HEIN G W, et al. Tracking GPS above GPS satellite altitude: first results of the GPS experiment on the HEO mission equator-S[C]//Proceedings of Position Location and Navigation Symposium. Palm Springs, CA: IEEE, 1998: 243-249.
  - [21] POWELL T D, MARTZEN P D, SEDLACEK S B, et al. GPS signals in a geosynchronous transfer orbit: "Falcon Gold" data processing[C]//Proceedings of Institute of Navigation National Technical Meeting. California: [s.n.], 1999: 575-585.
  - [22] MOREAU M C, DAVIS E P, CARPENTER J R. Results from the GPS flight experiment on the high earth orbit AMSAT OSCAR-40 spacecraft[C]//Proceedings of the Institute of Navigation GPS 2002 Conference. Portland, Oregon: [s.n.], 2002: 122-123.
  - [23] DAVIS G, MOREAU M, CARPENTER R, et al. GPS-based navigation and orbit determination for AMSAT AO-40 SatE-lite[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Monterey, CA: AIAA, 2002.
  - [24] EBINUMA T, UNWIN M. GPS receiver demonstration on a Galileo test bed satellite[J]. *Navigation*, 2007, 60(3): 349-362.
  - [25] UNWIN M, VAN STEENWIJK R D V, BLUNT P, et al. Navigating above the GPS constellation-preliminary results from the SGR-GEO on GIOVE-A [C]//Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS + 2013). Nashville, TN: [s.n.], 2013.
  - [26] WINTERNITZ L B, BAMFORD W A, PRICE S R, et al. Global positioning system navigation above 76,000 km for NASA's magnetospheric multiscale mission[J]. *Navigation*, 2017, 64(2): 289-300.
  - [27] FARAHMAND M, LONG A, HOLLISTER J, et al. Magnetospheric MultiScale mission navigation performance during apogee-raising and beyond[J]. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2018, 162: 2738-2739.
  - [28] FAN Min, HU Xiaogong, DONG Guangliang, et al. Orbit improvement for Chang'E-5T lunar returning probe with GNSS technique[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(11): 2473-2482.
  - [29] WANG Dun, DONG Qijia, WANG Meng, et al. Results from the GNSS flight experiment on the circumlunar free return trajectory of China CE-5T1 spacecraft[C]//Proceedings of the 66th International Astronautical Congress. Jerusalem: [s.n.], 2015.
  - [30] WANG Meng, SHAN Tao, MA Lin, et al. Performance of GPS and GPS/SINS navigation in the CE-5T1 skip re-entry mission[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(2): 56.
  - [31] JIANG Kcai, LI Min, WANG Meng, et al. TIS-2 geostationary satellite orbit determination using onboard GPS



- measurements[J]. GPS Solutions, 2018, 22(3): 87.
- [32] 李冰, 刘蕾, 王猛. GEO 卫星 GNSS 导航在轨长期性能验证与分析[J]. 上海航天, 2017, 34(4): 133-143.  
LI Bing, LIU Lei, WANG Meng. Performance demonstration and analysis of GNSS navigation in GEO satellites [J]. Aerospace Shanghai, 2017, 34(4): 133-143.
- [33] WINKLER S, RAMSEY G, FREY C, et al. GPS receiver on-orbit performance for the GOES-R spacecraft [C] // Proceedings of the 10th International ESA Conference on GNC Systems. Salzburg: [s.n.], 2017.
- [34] WINTERNITZ L B, BAMFORD W A, PRICE S R. New high-altitude GPS navigation results from the magnetospheric multi-scale spacecraft and simulations at lunar distances [C] // Proceedings of the 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, (ION GNSS+ 2017). Portland: [s.n.], 2017.
- [35] NEUMANN N, DE BRUIJN F, LÜBKE-OSSENBECK B, et al. In-flight results from the gps receiver on small-GEO [C] // Proceedings of the 68th International Astronautical Congress. Adelaide: [s.n.], 2017.
- [36] WENNERSTEN M D, BANES V, BOEGNER G, et al. PiVoT GPS receiver [C] // Proceedings of the ION GPS Conference 2001. Salt Lake City, UT: [s.n.], 2001: 855-861.
- [37] MEHLEN C, LAURICHESSE D. Real-time GEO orbit determination using TOPSTAR 3000 GPS receiver[J]. Navigation, 2001, 48(3): 169-179.
- [38] HARTRAMPF M, FILIPPI H, KRAUSS P A, et al. LION navigator for transfer to GEO using electric propulsion [C] // Proceedings of the 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS + 2015). Tampa, FL: [s.n.], 2015: 3910-3927.
- [39] KRAUSS P A, HARTRAMPF M, BARRIOS-MONTALVO A, et al. LION NEO: a versatile space GNSS receiver [C] // Proceedings of Guidance Navigation and Control 2016. Breckenridge: [s.n.], 2016: 355-366.
- [40] KING T. Extending the use of GPS to geostationary altitudes [C] // AIAA SPACE 2011 Conference & Exposition. Long Beach: AIAA, 2011: 1-9.
- [41] WINKLER S, VOBORIL C, HART R, et al. GOES-R use of GPS at GEO (Viceroy-4) [C] // Proceedings of the 2013 AAS Guidance and Control Conference. Breckenridge: [s.n.], 2013: 391-401.
- [42] DEMPSTER A G. Use of comb filters in GPS L1 receivers [J]. GPS Solutions, 2018, 12(3): 179-185.
- [43] HASSANIEH H, ADIB F, KATABI D, et al. Faster GPS via the sparse Fourier transform [C] // Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, NY: ACM, 2012: 353-364.
- [44] HARSHA P B S, RATNAM D V. Implementation of advanced carrier tracking algorithm using adaptive-extended Kalman filter for GNSS receivers [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(9): 1280-1284.
- [45] HENKEL P, GIGER K, GUNTHER C. Multifrequency, multisatellite vector phase-locked loop for robust carrier tracking [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2009, 3(4): 674-681.
- [46] CAPUANO V, BLUNT P, BOTTERON C, et al. Orbital filter aiding of a high sensitivity GPS receiver for lunar missions [C] // Proceedings of 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. Monterey, CA: [s.n.], 2016.
- [47] 张万威, 徐其超. 基于 GNSS 的地球静止轨道卫星自主定轨仿真研究 [C] // 第五届中国卫星导航学术年会论文集. 南京: 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 2014: 1001-1006.  
ZHANG Wanwei, XU Qichao. Simulation study on autonomous orbit determination for Geostationary satellite based on GNSS [C] // Proceedings of the 5th China Satellite Navigation Conference. Nanjing: Academic Exchange Center of China Satellite Navigation System Management Office, 2014: 1001-1006.
- [48] 袁俊军, 赵春梅, 吴琼宝. 资源三号 01 星及 02 星 GPS 天线 PCO、PCV 在轨估计及对精密定轨的影响 [J]. 测绘学报, 2018, 47(5): 672-682. DOI: 10.11947/j. AGCS.2018.20170703.  
YUAN Junjun, ZHAO Chunmei, WU Qiongbao. Phase center offset and phase center variation estimation in-flight for ZY-3 01 and ZY-3 02 Spaceborne GPS antennas and the influence on precision orbit determination [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(5): 672-682. DOI: 10.11947/j. AGCS.2018.20170703.
- [49] ZENG Tian, SUI Lifen, JIA Xiaolin, et al. Results and analyses of BDS precise orbit determination with the enhancement of Fengyun-3C [J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2019, 2(3): 68-78.
- [50] SU Xing, GENG Tao, LI Wenwen, et al. Chang'E-5T orbit determination using onboard GPS observations [J]. Sensors, 2017, 17(6): 1260.
- [51] 李铁映, 杨慧, 王海红. 导航卫星光压建模及表面光学特性参数影响分析 [J]. 宇航学报, 2015, 36(6): 731-738.  
LI Tieying, YANG Hui, WANG Haihong. Navigation satellite solar radiation of the effect of surface pressure modeling and analysis optical parameters [J]. Journal of Astronautics, 2015, 36(6): 731-738.
- [52] 陈秋丽, 杨慧, 陈忠贵, 等. 北斗卫星太阳光压解析模型建立及应用 [J]. 测绘学报, 2019, 48(2): 169-175. DOI: 10.11947/j. AGCS.2019.20180097.  
CHEN Qiuli, YANG Hui, CHEN Zhonggui, et al. Solar radiation pressure modeling and application of BDS satellite [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(2): 169-175. DOI: 10.11947/j. AGCS.

- 2019.20180097.
- [53] 范利涛, 吴杰, 汤国建. GPS 差分相对定位应用于航天器自主交会对接的研究[J]. 飞行器测控学报, 2008, 27(3): 78-81.
- FAN Litao, WU Jie, TANG Guojian. Researches on DGPS for spacecraft autonomous rendezvous and docking [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2008, 27(3): 78-81.
- [54] LANE C, AXELRAD P. Analysis of relative navigation in high earth orbits[J]. The Journal of the Astronautical Sciences, 2007, 55(1): 23-52.
- [55] LANE C, AXELRAD P. Relative semimajor axis uncertainty in high earth orbits[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2007, 30(6): 1835-1839.
- [56] MOHIUDDIN S, PSIAKI M. Filtered dual-frequency carrier-phase differential GPS for relative navigation of high-altitude spacecraft [C] // Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Keystone, CO: AIAA, 2006.
- [57] 郭树人, 蔡洪亮, 孟轶男, 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. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190091.
- 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. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190091.
- [58] MUSUMECI L, DOVIS F, SILVA J S, et al. Design of a high sensitivity GNSS receiver for lunar missions[J]. Advances in Space Research, 2016, 57(11): 2285-2313.
- [59] ASHMAN B W, PARKER J J, BAUER F H, et al. Exploring the limits of high altitude GPS for future lunar missions[C]//Proceedings of the 41st Annual AAS Guidance and Control Conference. Breckenridge, CO: AAS, 2018.
- [60] CAPUANO V, BOTTERON C, LECL?RE J, et al. Feasibility study of GNSS as navigation system to reach the Moon[J]. Acta Astronautica, 2015, 116: 186-201.
- [61] 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. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190176.
- ZHANG Xiaohong, MA Fujian. Review of the development of LEO navigation-augmented GNSS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(9): 1073-1087. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190176.
- [62] LI Wenwen, LI Min, ZHAO Qile, et al. Extraction of electron density profiles with geostationary satellite-based GPS side lobe occultation signals [J]. GPS Solutions, 2019, 23(4): 110.

(责任编辑:张燕燕)

收稿日期: 2020-05-06

修回日期: 2020-06-27

第一作者简介: 王猛(1982—),男,博士生,研究员,研究方向为卫星导航技术。

First author: WANG Meng(1982—), male, PhD candidate, researcher, majors in satellite navigation technology.

E-mail: wangmeng104@163.com