

一种可补充和验证 GNSS 的低轨 PNT 系统设计

金玲 窦骄 刘志佳 严林

(航天东方红卫星有限公司,北京,100094)

摘要:提出了一种以星上有效载荷的形式搭载在低轨综合卫星平台上的 PNT 服务系统,可作为 GNSS 系统的补充、备份和验证手段。本文总结了低轨卫星 PNT 服务的发展现状,提出了该低轨 PNT 服务系统的设计方案和总体架构,分析了系统的工作原理、服务性能以及对 GNSS 系统的可补充和验证性。最后给出了系统建设需要研究的几项关键技术,初步论证了该 PNT 系统的可行性和技术可实现性。

关键词:低轨 PNT;GNSS 补充及验证;导航有效载荷;伪距多普勒联合定位

中图分类号:V57 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2018)S1-0103-05

Design of LEO-Based PNT System for GNSS Backup and Validation

JIN Ling, DOU Jiao, LIU Zhijia, YAN Lin

(DFH Satellite Co Ltd, Beijing, 100094, China)

Abstract: A PNT service system in the form of a hosted payload piggybacked on the common platform of LEO constellation is presented as a complement, backup and verification for GNSS system. The development status of LEO-based PNT is summarized, the strategy and overall framework of this LEO-based PNT system are presented, then the working principle and service performance of this system for backup and verification for GNSS are analyzed. Finally the key technologies for system construction are introduced, and the feasibilities of strategy and technologies for the PNT system are preliminarily demonstrated.

Key words: LEO-based PNT; GNSS backup and validation; navigation hosted payload pseudorange-Doppler joint positioning

中国国家综合定位、导航、授时(Positioning, Navigation, and Timing, PNT)体系逐渐发展为以全球导航卫星(Global navigation satellite system, GNSS)为核心,联合其他 PNT 系统,共同实现对各用户的全覆盖、高性能和高可靠服务^[1]。GNSS 系统作为中高轨卫星,具有天然的脆弱性,信号弱、穿透能力差、易被欺骗与干扰。文献[2]中阐述自 2016 年 5 月铱星提供低轨卫星的时间和位置服务(Satellite timing and location, STL)起,许多工业和政府机构已经开始在 GNSS 受到干扰和遮挡的场景中使用这种基于低轨道卫星(Low

earth orbit, LEO)的信号服务,基于低轨卫星的 PNT 服务成为重要的发展趋势。LEO 具有全球覆盖性,距离地球近,可提供更强的信号作为 GNSS 系统增强、补充、备份和验证的手段。基于低轨卫星辅助 GNSS 的 PNT 服务主要分为两个方向:(1)增强。通过 LEO 卫星播发差分改正信息和测距信号等,侧重于提高 GNSS 系统的精度和完好性,增强的重要特征是与 GNSS 组网、兼容,一般增强系统均是通过自身的导航频点、信号体制来播发差分改正参数和测距信号,用户使用统一的接收终端来接收,这也就限制了信号的发射功

收稿日期:2018-03-23;修订日期:2018-05-30

通信作者:金玲,女,工程师,E-mail:lingj07@163.com。

引用格式:金玲,窦骄,刘志佳,等.一种可补充和验证 GNSS 的低轨 PNT 系统设计[J].南京航空航天大学学报,2018,50(S1):103-107. JIN Ling, DOU Jiao, LIU Zhijia, et al. Design of LEO-based PNT system for GNSS backup and validation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(S1):103-107.

率,信号太强影响 GNSS 正常信号的接收。(2) 补充、备份和验证。其重要特征是独立,LEO 星座播发独立的导航信号,可采用不同的频点和信号体制来实现,采用独立的终端来接收,可大幅提高信号强度来提高信号的抗干扰和穿透能力。当 GNSS 由于信号阻塞或电磁干扰而不可用时,作为 GNSS 系统的一种补充和备份,同时也可以作为 GNSS 防止恶意欺骗的验证手段。

铱星采取的是作为 GNSS 系统的补充、备份和验证模式,但铱星只公布一些服务和性能指标,很少公开其系统架构及关键技术。中国目前提出的夔龙、鸿雁等 LEO 星座均属于增强系统,通过播发差分信息等提高 GNSS 的精度和完好性。目前国内尚未见公布作为 GNSS 系统的补充、备份和验证模式的基于 LEO 的 PNT 系统。本文结合目前的低轨卫星系统的发展现状,借鉴铱星的发展模式,探索建设基于低轨卫星的可补充和验证 GNSS 的 PNT 服务系统的设计、需研究的关键技术等。

1 国内外发展现状

目前国外补充、备份和验证 GNSS 的低轨 PNT 服务主要为铱星系统。铱星系统为通信系统,轨道高度 780 km,分布在 6 个极地轨道上。2016 年 5 月,铱星开始提供称为“卫星授时与定位”(STL)服务,它是在 GNSS 不可用时提供一种高可靠的授时和定位服务,作为 GNSS 系统的一种补充、备份和验证系统。与 GNSS 一样,STL 服务利用铱星播发专门设计的授时和定位电文,由于其高射功率和信号编码增益,大幅提高了信号的抗干扰能力和穿透能力。同时,铱星信号经过特殊设计使其自身具有物理安全性,用来实时验证 GNSS 定位导航和授时的正确性,以减轻潜在的欺骗威胁。铱星经过特殊的定位算法,在卫星数较少时也能实现三维定位。STL 服务声称在具有严重信号衰减的室内环境下的测试结果显示,定位精度 20 m 左右,授时误差小于 $1 \mu\text{s}$ ^[2-3],这项服务还会在下一代铱星部署后持续改进。

中国目前正在论证建设的与 PNT 相关的低轨星座有夔龙系统、鸿雁系统等,基本都是 GNSS 增强系统。鸿雁卫星星座通信系统,该系统将由 60 颗低轨小卫星及全球数据业务处理中心组成,为用户提供全球实时数据通信和综合信息服务。其导航增强功能可为北斗导航卫星增强系统提供信息播发通道,提高北斗导航定位精度。夔龙系统的建设目标是建成多星座兼容、天地一体、全球服务的精度和完好性增强信号系统。系统的空间组

成部分由地球精度球同步轨道通信卫星进行信号广播,在鸿雁星座建成后,将通过鸿雁星座的下行链路播发进行信号广播。建成后,夔龙系统将通过全球 300 多个参考站收集的数据,精确计算各卫星导航系统在轨道、时钟和传播延迟上的误差改正数,并将这些误差通过多种播发方式发送给终端,可以显著提升系统的定位精度和完好性。目前,国内尚未公布基于 LEO 星座的作为 GNSS 系统的补充、备份和验证的 PNT 服务系统。

2 系统建设架构

2.1 系统概述

随着卫星平台综合一体化,载荷模块化发展,该 PNT 服务设计为采用有效载荷搭载的形式,可搭载在具有一定规模的组网星座上,目前中国也在大力发展遥感、通信和宽带互联网组网星座,为低轨 PNT 系统的建设提供了很好的平台基础。该 PNT 系统设计主体为导航有效载荷设计,可充分结合低轨卫星大星座、落地信号强以及多普勒特性好等特点,在干扰、城市峡谷和室内等 GNSS 应用受限情况下提供的 PNT 服务。同时也可以作为 GNSS 应用时防止恶意欺骗的验证手段。

2.2 系统设计方案及架构

该 PNT 系统由空间段、地面运控段和用户端 3 部分构成,如图 1 所示。根据有效载荷设计方式的不同分为两种设计方案。

空间段包括综合卫星平台和有效载荷,首先需要选择搭载的综合卫星平台,对综合卫星平台的要求主要有:具有一定规模的几何分布较好、能够提供足够的功耗、重量的组网星座,国内可供搭载的有遥感、通信或宽带互联网星座,特别是即将建设的宽带互连网服务星座,规模较大,实现全球覆盖。

星上有效载荷实现含有导航电文(卫星位置和时间等信息)的导航信号的连续播发。导航电文的生成可以由地面上注或星上自主生成,对有效载荷的两种设计方案。方案 1 星上自主生成,是用 GNSS 接收机对 LEO 星座定轨、时间同步,生成星历、时间等信息转发给 LEO 导航信号生成发射机,信号生成发射机生成带导航电文的射频调制信号。此方案有效载荷由 GNSS 接收机、信号生成发射机和发射天线组成。方案 2 是通过地面站进行定轨和时间同步,生成导航电文信息上注给有效载荷,有效载荷则由上注信号接收机、导航信号生成发射机和发射天线组成。方案 1 成本相对较低,根据 GNSS 接收机定轨授时指标也能满足低轨卫星 PNT 性能需求^[4-5],并且对地面站的附加功能需求也较少,该方案未完全独立于 GNSS,但 LEO

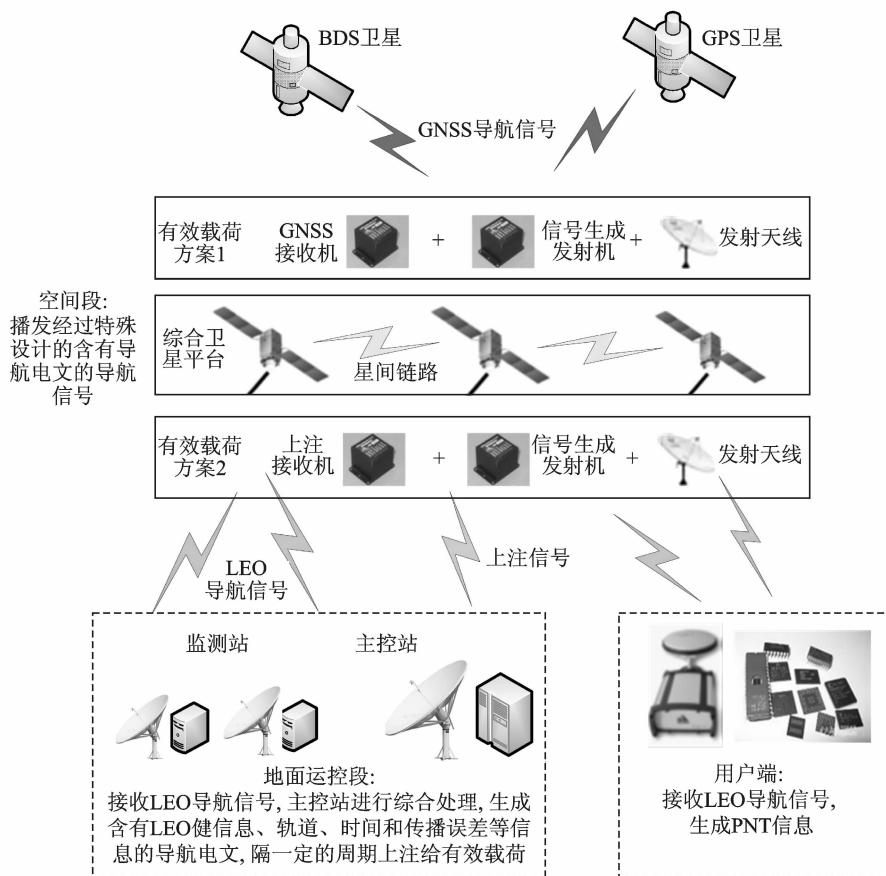


图 1 系统的总体架构图

Fig. 1 The overall framework diagram of system

星上的接收机基本不存在遮挡问题,受干扰程度也远低于地面的接收机。方案 2 的导航电文精度取决于地面站的数目和星地时间同步精度,对地面站数目和星地时间同步系统有一定要求,建设成本相对较高,方案 2 适用于军事应用,当战时星上 GNSS 接收机有不可用的风险,可以作为方案 1 的备份手段。

地面运控段包括对卫星的地面监测、处理和上注等功能。接收星上载荷的播发的信号,通过处理进行定轨、时间同步、监测卫星的健康状态等,有效载荷方案 1 对应的地面站的需求为监测低轨星座和导航载荷的健康信息及上注。有效载荷方案 2 需要生成卫星的健康信息、星历、时间等参数进行上注,参数精度取决于地面站的数目和星地时间系统。

用户端需要结合系统建设情况统一设计,接收系统的导航信号,设计定位解算算法得出三维的位置和时间信息。目标是设计为接口统一、集成度很高的芯片,方便不同的终端集成,如集成到 GNSS 接收机中。

方案 1 和方案 2 载荷和地面站实现方式上有些不同,但工作原理和用户端设计均一致。低轨

PNT 系统设计可根据需求和成本进行裁剪,若为民用系统,可以只选用方案一设计。若为军民两用,可以方案 1 为主份,方案 2 为备份,为战时增加系统的可靠性。

2.3 系统 PNT 工作原理及性能

该系统是一个基于到达时间测距原理的无线电定位系统。其 PNT 服务的基本原理是测距交会原理,至少需要 4 颗卫星才能求解出用户的三维位置、以及与系统的时间差 4 个未知数。与 GNSS 不同的是,LEO 卫星运动速度快,具有更好的多普勒特性,PNT 服务充分利用低轨卫星多普勒特性,使得可见星数小于 4 颗的定位授时方法更多样化。

PNT 系统的服务性能主要有精度、可用性等,如图 2 所示。PNT 系统服务精度(σ_{error})是指为用户提供的位置与当时真实位置的重合度,取决于用户与可见卫星的几何分布(又称精度因子 DOP)和空间信号的用户距离误差(SIS URE)。

$$\sigma_{\text{error}} = \text{DOP} * \text{SIS URE} \quad (1)$$

服务精度的影响因素主要如图 2 所示。其中 SIS URE 主要与有效载荷的设计有关,特别是时钟的选择、时间同步、定轨方法以及信号设计等。DOP 取决于 LEO 卫星的轨道设计及数量。随着

卫星数目的增加, DOP 减少。

可用性是指系统能为用户提供可用的导航服务的时间占整个时间段的比例。相比 GNSS 系统, 低轨卫星接收的信号功率更强, 有

$$P = P_T / 4\pi R^2 \quad (2)$$

式中: P 为接收到的信号功率密度; P_T 为发射信号功率; R 为卫星与用户的距离。对应 MEO 卫星, R 约为 26 500 km, 对于 LEO, R 约为 700 km, 则相同发射功率情况下, LEO 落地信号强近 1 500 倍。在干扰、城市峡谷和室内等 GNSS 应用受限情况下, 均可提供的 PNT 服务作为 GNSS 的补充手段。同时系统会在信号与天线方面考虑安全性设计, 提高系统的防欺骗能力, 并作为 GNSS 的一种验证手段。随着低轨星座的规模扩大, 系统的精度和可用性会稳步提升。

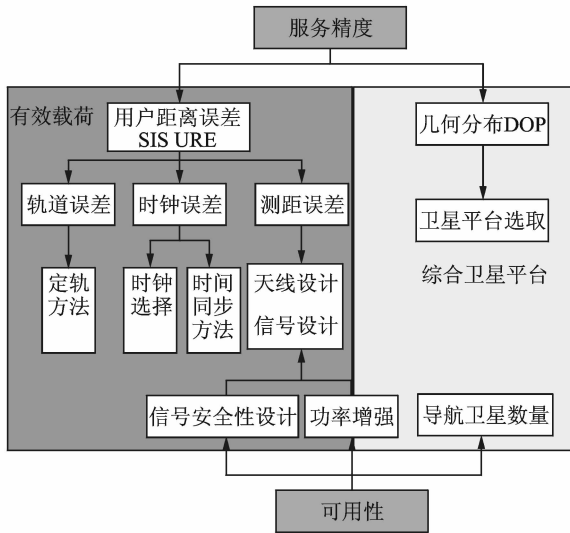


图2 系统服务性能分析

Fig. 2 The analysis of system service performance

3 系统建设的关键技术

从系统构成和服务性能分析得出, 低轨 PNT 系统建设需要研究的关键技术包括定位方法与时间同步方法、载荷的信号设计以及当卫星不足时的终端解算技术等。

3.1 定轨方法与时间同步方法

目前常用的 LEO 低轨卫星的定轨及时间同步方法有星间链路法、星载 GNSS 接收机法和地面运控段法。

星间链路的方法进行定轨和时间同步: 通过星间链路间的距离测量与卫星间的相对位置关系约束进行定轨和时间同步^[6], 该方法一般用于辅助, 提供更多的测量信息, 无法独立完成定轨和时间同步。

星载 GNSS 接收机定轨和时间同步法: GNSS 接收机定轨结合实时星历、伪距载波相位观测量和

LEO 卫星的动力学方程进行处理, 实时能达到米级^[4-5]。GNSS 接收机时间同步可以调整接收时钟与 GNSS 系统时同步, 一般的晶振时钟就能达到近百纳秒的精度。但该方法下每个星之间导航载荷是独立, 因此可以联合星间链路法, 采用 GNSS 星间相对状态测量方法, 进一步提高定轨和时间同步精度。

地面运控段进行定轨和时间同步: 通过地面监测站接收星上观测数据, 如伪距和载波相位。由地面监测网将监测站的数据传输到主控站进行定轨和时间同步, 其精度取决于地面站的数量、性能、定轨算法和星地时钟^[7-8]。考虑到全球布站难度之大, 星间链路的出现给该问题带来了突破口, 加入星间链路测量量, 星地之间的构型得到很大改善, 星地/星间定轨能极大减少地面站的数量, 同时提高定轨和时间同步的精度。

因此, 对应有效载荷方案 1, 可采用联合星载 GNSS 接收机和星间链路的方法进行定轨和时间同步, 可通过 GNSS 相对状态测量的方法提高精度。对应有效载荷方案 2, 可采用星地/星间联合定轨和时间同步, 模型的建立和融合算法需要深入研究。同时, 星间链路的建立与路由也是需要研究的难点。

3.2 载荷信号设计

该载荷的信号设计主要从频点、功率增强和信号安全性 3 个方面去考虑。

载波频点的选择是信号设计中最重要几个关键因素之一, 直接关系到信号的传播特性(空间损耗、电离层延迟)、发射接收硬件实现成本、多普勒频移的大小以及与其他无线电系统之间的干扰。ITU 公布的可供导航使用的频点有 L 频段的 S 频段的 2 483.5~2 500 MHz 及 C 频段的 5 010~5 030 MHz, 目前 L 频段相对拥挤, 已经建设和将要建设的系统的信号频谱占据了上 L 频段(1 559~1 610 MHz)和下 L 频段(1 164~1 300 MHz)^[9]。铱星的使用频段为 1 616~1 625.5 MHz。S 频段仅北斗卫星导航系统 RDSS 服务和印度区域导航系统使用。空间损耗载波频率的平方成正比, 电离层的群延迟与载波频率的平方成反比, 且低频点电离层波动大。本系统选用频点的原则在不影响已有的导航系统前提下, 综合考虑信号空间损耗、电离层延迟、天线尺寸、发射接收硬件实现成本等因素, 在 ITU 公布的可供导航使用的 L 频段和 S 频段选择一个或两个频段。

与功率增强相关的包括信号发射功率、天线的增益、编码增益等, 信号发射功率受到有效载荷的成本、重量和功耗的限制, 这与综合平台的搭载能力有关。

与信号的安全性相关的设计包括信号体制和天线设计,信号体制方面采用授权信号和认证机制等,天线波束通过多点波束实现重复覆盖,随机播发信号的机制提高系统的安全性^[10],这也是需要研究的重难点之一,对于低轨卫星的防欺骗性能意义重大。

3.3 低轨 PNT 终端解算技术

终端接收信号解算 PNT 信息,当可见性数达到 4 颗及以上时,终端定位解算方法与 GNSS 基本一致,可以用伪距、载波相位、多普勒进行定位解算。系统建设过程中,可见卫星会小于 4 颗,相比 MEO,低轨卫星信号覆盖区域小,大约 7 颗 LEO 卫星的覆盖区域与 1 颗 MEO 卫星的覆盖区域相当。因此,大概需要 200+卫星与北斗与 GPS 的覆盖情况相当。

当可见卫星数小于 4 颗时,需要经过特殊的处理才能求解三维位置和时间信息,如表 1 所示。低轨卫星运动速度快,多普勒特性好,时间相关性弱,静态用户可以采用多历元连续定位法^[11]。动态用户当可见星大于或等于 2 颗时,可以采用伪距与多普勒法联合扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman filter, EKF)。当卫星数为 1 颗时,可以联合高度计或惯性测量单元(Inertial measurement unit, IMU)等进行定位授时。可见星不足时的这些特殊定位算法也需要进一步深入研究,对系统的最终 PNT 性能至关重要。

表 1 可见星数与 PNT 解算算法对应关系

Tab. 1 Relationship between visible satellite number and PNT solution algorithms

| 可见星数(st) | 动态 | 静态 |
|-----------------|-------------|---------|
| $st \geq 4$ | 测距交会 | 测距交会 |
| $2 \leq st < 4$ | 伪距多普勒联合 EKF | 多历元连续解算 |
| $st = 1$ | 联合高度计或 IMU | 多历元连续解算 |

4 结束语

本文结合低轨卫星的发展现状,提出了一种搭载在低轨综合卫星平台上的 PNT 服务系统。文中给出了系统和有效载荷设计方案,并对服务性能进行分析,提供更强的信号和更好的多普勒特性,可作为 GNSS 应用受限时国家 PNT 服务的重要补充手段,经过信号的安全性设计,可作为 GNSS 防止欺骗的验证手段。最后总结了系统建设需要研究的关键技术,并给出了初步算法,后续需要进一步深入研究。随着国内外下一代的大星座低轨综合卫星平台建设,为系统的性能提升与应用发展

会提供更广阔的空间。

参考文献:

- [1] 刘庆军,刘锋,武向军. 国家综合 PNT 体系的总体架构及时空基准[C]//中国卫星导航学术年会. 上海: [s. n.], 2017.
LIU Qingjin, LIU Feng, WU Xiangjun. The architecture of national integrated PNT system and its time-space reference[C]//China Annual Conference on Satellite Navigation. Shanghai: [s. n.], 2017.
- [2] GPS World Staff. Navigation from LEO: Current capability and future promise[EB/OL]. [2017]. <http://gpsworld.com>.
- [3] TYLER G R R. Orbit diversity for global navigation satellite systems[D]. Palo Alto, USA: Stanford University, 2017.
- [4] 刘伟平,郝金明. 几种 LEO 星载 GNSS 精密定轨方法的对比分析[J]. 测绘科学技术学报, 2014(2):140-144.
LIU Weiping, HAO Jinming. Comparative analysis of several kinds of GNSS-based LEO precise orbit determination methods[J]. Journal of Surveying and Mapping Science and Technology, 2014(2):140-144.
- [5] 朱波,聂桂根. 利用星载 GPS 接收机进行低轨卫星与卫星时间同步[J]. 测绘信息与工程, 2007, 32(1):29-34.
ZHU Bo, NIE GuiGen. On LEO satellites time synchronization with GPS receiver onboard[J]. Journal of Geomatics, 2007, 32(1):29-34.
- [6] WOLF R. Satellite orbit and ephemeris determination using inter satellite links[D]. Munich: University of Bundeswehr, 2000.
- [7] ENGE P, FERRELL B, BENNETT J, et al. Orbital diversity for satellite navigation[C]//Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012). Nashville, TN: [s. n.], 2012.
- [8] WALTER T F. Orbital diversity for satellite navigation[C]//China Annual Conference on Satellite Navigation (CSNC-ION). Shanghai: [s. n.], 2017.
- [9] 姚铮,陆明泉. 新一代卫星导航系统系统信号设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2016:27-41.
- [10] REID T G R, NEISH A M, WALTER T F. Leveraging commercial broadband LEO constellations for navigation[C]//International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Portland: [s. n.], 2016.
- [11] PAN L. Research on airborne passive location technologies based on doppler frequency Difference[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.