

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107049

# 一种基于平行系统的大型复杂天基组网星座 自主运行框架

黄文德<sup>1,3</sup> 贺达江<sup>1</sup> 朱贤武<sup>1</sup> 杨玉婷<sup>2</sup> 张利云<sup>3</sup> 康娟<sup>3</sup> 李靖<sup>3</sup>(1.怀化学院电气与信息工程学院 怀化 418000; 2.北京卫星导航中心 北京 100094;  
3.广西科学院北斗创新应用研究中心 南宁 530007)

**摘要:**针对成百上千甚至上万颗卫星组成的大型复杂天基组网星座,单靠地面测控网难以满足对卫星实时管控的问题,以及单靠星座组网自主测控存在的长时间偏离地面基准(时间和空间基准)等风险,本文综合考虑地面测控网以及星间组网的优势,提出大型组网星座自主运行的平行系统方法。通过构建天地一体平行系统,在 ACP 框架作用下,形成以组网星座自主处理为主、地面平行系统支持为辅的天地一体平行运行机制,从而实现大型组网星座自主管控、自主观测、自主处理和自主监测等自主运行功能。研究结果表明,本文提出的方法在大型复杂星座的自主运行方面具有参考价值。

**关键词:**大型复杂星座;自主运行;平行系统;自主定轨;时间同步

**中图分类号:** V11 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.99

## Framework for autonomous operation of large complex space-based network constellation based on parallel systems

Huang Wende<sup>1,3</sup> He Dajiang<sup>1</sup> Mi Xianwu<sup>1</sup> Yang Yuting<sup>2</sup> Zhang Liyun<sup>3</sup> Kang Juan<sup>3</sup> Li Jing<sup>3</sup>(1. School of Electrical and Information Engineering, Huaihua University, Huaihua 418000, China;  
2. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China; 3. BeiDou Innovation and Application  
Research Center of Guangxi Academy of Sciences, Nanning 530007, China)

**Abstract:** In view of the large and complex space-based network constellation composed of hundreds, thousands, or even tens of thousands of satellites, the ground-based measurement and control network alone cannot meet the problem of real-time satellite management and control, and the long-term deviation from the ground reference caused by the independent measurement and control of the constellation network alone (Time and space benchmarks) and other risks, this paper comprehensively considers the advantages of ground-based measurement and control network and inter-satellite networking, and proposes a parallel system method for autonomous operation of large-scale networking constellations. Through the construction of a space-earth integrated parallel system, under the action of the ACP framework, a space-earth integrated parallel operation mechanism is formed with the network constellation autonomous processing as the main and the ground parallel system support as a supplement, so as to realize the large-scale network constellation autonomous control, autonomous observation, and autonomous processing and autonomous monitoring and other autonomous operation functions. The research results show that the method proposed in this paper has reference value in the autonomous operation of large and complex constellations.

**Keywords:** large complex constellations; autonomous operation; parallel systems; autonomous orbit determination; time synchronization

## 0 引言

近年来,涉及商业火箭、商业卫星、商业测控等多个领

域的商业航天活动发展十分迅速。在商业航天领域,处于领先优势的是马斯克的 Space-X,该公司于 2014 年左右提出了组建全球互联网“星链计划”(Star-link),其空间星座

由 12 000 余颗卫星组成,因此又称“万星计划”。另一个竞争对手是 OneWeb(一网)公司,在 Space-X 之后提出建设由 648 颗(18 个轨道面,每个轨道面 36 颗星)卫星组成的太空互联网。2019 年 4 月,亚马逊(Amazon)推出名为“Kuiper”的计划,该计划将建立 3000 余颗卫星组成的太空互联网星座。此外,Telesat(通信卫星公司)在去年发射了第一颗原型卫星后,计划在 2020 年再发射数百颗卫星。除此之外,国外还有 Telesat 公司、Lcosat 等多家公司宣布进军星座互联网市场。在这些巨头公司的推波助澜下,全球商业航天迎来了一波接一波高潮。这波航天计划最大的特点是:大型复杂组网星座唱主角<sup>[1-3]</sup>。

国内航天也不甘落后。目前国内从事这些领域,并具有一定规模的商业航天公司,以及体制内的集团公司也加入商业航天的发展行列。国内有航科集团“鸿雁”、科工集团“虹云”、电科集团“天地一体化网络”以及银河航天低轨宽带星座等<sup>[4]</sup>。未来,太空中将运行数千数万颗卫星,如何有效管控这些复杂的星座?传统方法经过改进、扩容是否可满足?通过星间链路实现自主运行<sup>[5-9]</sup>是不是新的更加高效的方法?

本文从大型复杂的自主运行角度出发,重点解决大型复杂星座的管控问题。主要考察以下两大问题:一是在地面资源有限的情况下,大型复杂组网星座如何自主运行。二是地面对大型复杂组网星座的运行情况如何监测。

### 1 基于平行因子的自主运行数学模型

平行系统理论是由王飞跃教授提出的、旨在解决复杂系统建模、实验和控制的问题<sup>[10-12]</sup>。平行系统的核心是 ACP 方法,主要由 3 部分组成:1)由实际系统的小数据驱动,借助知识表示与知识学习等手段,针对实际系统中的各类元素和问题,基于多智能体方法构建可计算、可重构、可编程的软件定义的对象、软件定义的流程、软件定义的关系等,进而将这些对象、关系、流程等组合成软件定义的人工系统(A),利用人工系统对复杂系统问题进行建模;2)基于人工系统这一“计算实验室”,利用计算实验(C),设计各类智能体的组合及交互规则,产生各类场景,运行产生完备的场景数据,并借助机器学习、数据挖掘等手段,对数据进行分析,求得各类场景下的最优策略。3)将人工系统与实际系统同时并举,通过一定的方式进行虚实互动,以平行执行(P)引导和管理实际系统。

本文引入平行因子 $\lambda$ (类似于求函数极值的拉格朗日乘数法,见下文算法模型的推导),将复杂天基组网星座的天地一体平行演化问题转化为平行系统理论(ACP)框架下的平行因子的“平行预估”与“自适应校正”问题<sup>[13-14]</sup>。在实现上,首先以人工系统(A)为基础,利用人工智能(AI)算法实现对平行因子的“平行预估”;然后,借助平行计算(C)理论,通过将地面处理结果与星座自主处理结果进行比较和分析学习,并基于自适应卡尔曼滤波(AKF)等算法实现平

行因子的“自适应校正”,即寻找最优的平行因子 $\lambda$ ;最终实现组网星座在平行执行(P)框架下的最优化自主处理。整个方法的主要思想如图 1 所示。

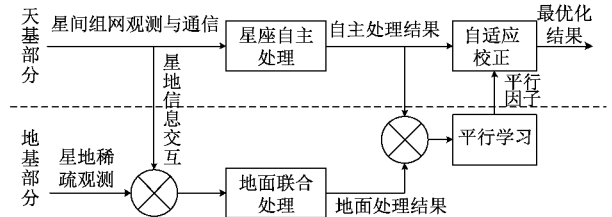


图 1 基于平行系统的组网星座最优自主处理框架

组网星座自主处理的最终目的是使得自主处理结果达到或无限逼近地面处理结果。本文主要思想就是通过星地平行运行,使得星上自主处理不断地“学习”地面处理方法,从而实现最优处理。因此,可以将这一过程“等同于”有约束条件下的最优值问题。

根据拉格朗日乘数法(Lagrange multiplier method)求极值原理,若存在关系式:

$$\begin{cases} z = f(x) \\ g(x) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

则可建立拉格朗日函数:

$$L(x, \lambda) = f(x) + \lambda g(x) \quad (2)$$

若最优解存在,则必然存在一个 $x_m$ 和 $\lambda_m$ ,使得 $x_m$ 是拉格朗日函数的最优解。且满足:

$$\begin{cases} \left. \frac{\delta F}{\delta x} \right|_{x=x_m} = f'(x) + g'(x) = 0 \\ \left. \frac{\delta F}{\delta \lambda} \right|_{\lambda=\lambda_m} = g(x) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

同理,假设 $\mathbf{X}^S$ 为组网星座自主处理结果, $\mathbf{X}_G$ 为地面精密处理结果。则存在如下关系式:

$$\begin{cases} \mathbf{Z} = \mathbf{F}(\mathbf{X}^S) \\ \mathbf{G}(\mathbf{X}_G) = 0 \\ \mathbf{X}^S - \mathbf{X}_G = \Delta \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{F}(\mathbf{X}^S)$ 为组网星座自主处理的适应度函数, $\mathbf{G}(\mathbf{X}_G)$ 为地面精密处理的适应度函数, $\Delta$ 为组网星座自主处理结果与地面精密处理结果之差。组网星座整网最优自主定轨的目的是使得 $\mathbf{X}^S \cong \mathbf{X}_G$ ,或者 $|\Delta| \rightarrow 0$ 。

类比于拉格朗日乘数法,引入平行因子 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ ,构造平行适应度函数:

$$L(\mathbf{X}^S, \mathbf{X}_G, \lambda_1, \lambda_2) = \mathbf{F}(\mathbf{X}^S) + \lambda_1 \mathbf{G}(\mathbf{X}_G) + \lambda_2 (\mathbf{X}^S - \mathbf{X}_G) \quad (5)$$

显然,该适应度函数不存在显示表达式,不能直接根据拉格朗日乘数法求极值原理进行求解。因此,本文通过构建平行系统理论(ACP)框架下平行因子的“平行预估”与“平行校正”,寻找最优的平行因子 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ ,实现组网星座整网最优自主定轨 $\mathbf{X}_m^S$ 。

### 2 基于平行系统的自主运行框架

最优处理的平行实验设计框架如图 2 所示。本文主要的实验方法则是利用神经网络方法。利用反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)对

星座自主定轨与地面高精度定轨结果进行平行学习。BPNN 是人工神经网络中最重要的网络之一,体现了人工神经网络的精华,其本质是以网络误差的平方和为目标函数,按梯度下降算法求其目标函数达到最小值的算法。

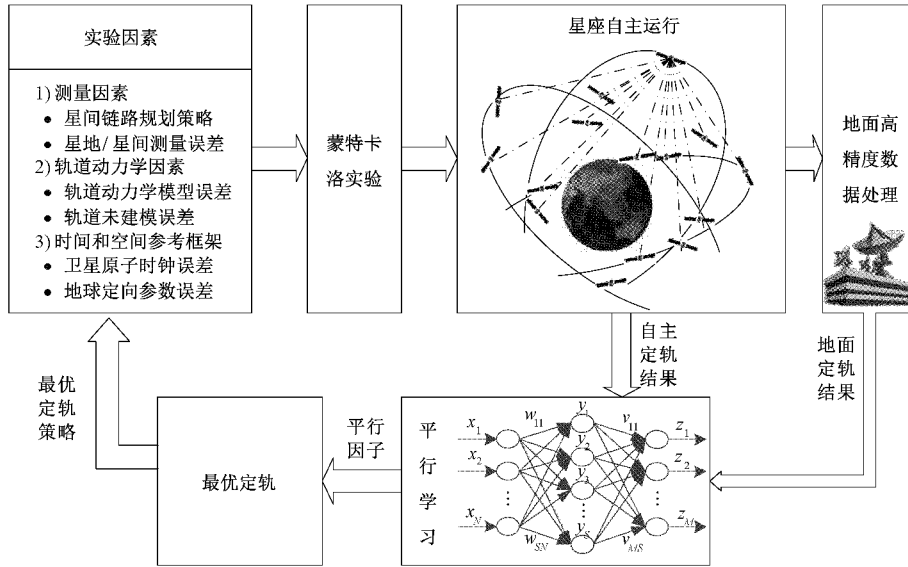


图 2 导航星座最优自主定轨的平行实验设计

在实际的卫星导航星座自主运行中,考虑到星载计算机的计算资源有限等问题,本文将平行学习置于地面,以

充分利用地面丰富的计算资源和强大的数据处理能力。平行执行的步骤如图 3 所示。

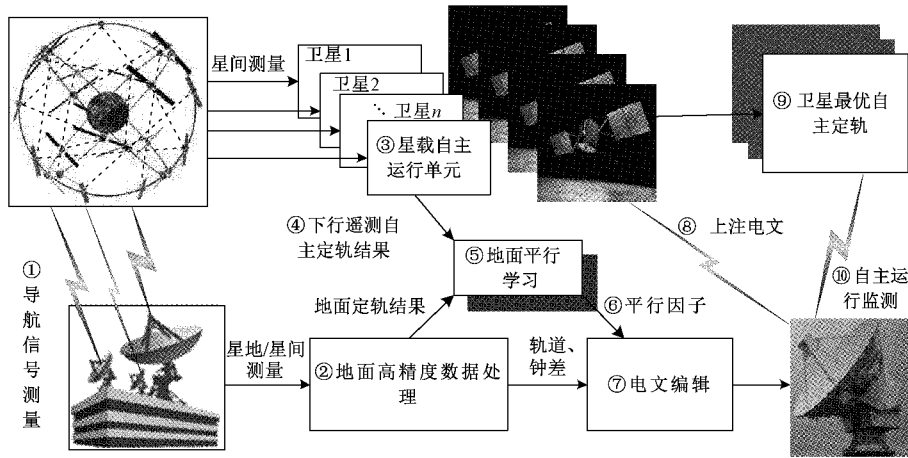


图 3 导航星座最优自主定轨平行执行框架

首先,OCS的地面监测站观测导航信号 L 波段数据,并通过 S 波段接收机收集星间链路观测数据。MCS 收集所有监测站和星间观测数据进行地面高精度数据处理,得到高精度卫星轨道和长期预报星历,然后长期预报星历以导航电文的形式被上注给卫星。

卫星以地面上注的长期预报星历为初始值,通过星间测量,不断改进长期预报星历误差,即自主定轨。地面通过接收星上遥测信息,获得星座自主定轨结果,从而启动

平行学习过程。

平行学习的主要结果是平行因子和平移/旋转校正参数,以电文的形式上注卫星,卫星在自主定轨的基础上,进行加权修正,从而得到最优定轨结果。

### 3 仿真算例

以典型导航星座为例,构建了由 24 颗卫星组成的导航星座和由 20 个地面站组成的地面处理网。

若仅单纯依靠星间观测进行导航星座自主定轨,其结果随时间逐渐发散,如图4所示。

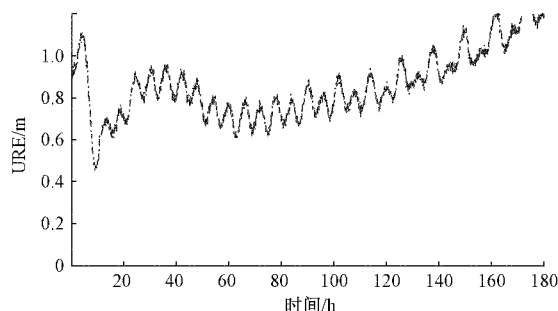


图4 单纯依靠星间观测的星座自主定轨结果

若采用本文方法,结合动力学短弧段伪逆平差法<sup>[15]</sup>,通过平行运行一段时间后,导航星座自主定轨结果可以无限逼近地面精密定轨精度,且无明显发散的现象,如图5所示。

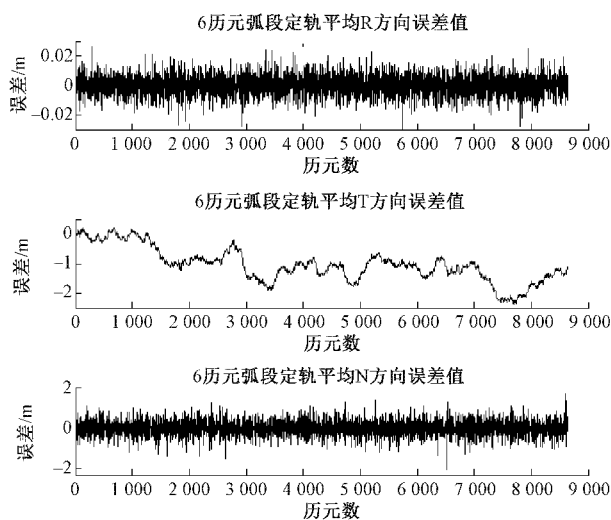


图5 基于平行系统理论的星座最优自主定轨结果

长达数月甚至半年(60、90或180 d)的星座自主运行过程,保持星座自主定轨精度是一个严峻挑战。包括动力学模型参数精度、测量误差和地球定向参数预报误差在内的诸多因素,都会导致轨道精度随时间衰减。利用地面支持条件下的高精度定轨与星座自主定轨结果进行平行学习,使模型参数、预报误差在平行进化中提高精度,从而减弱上述因素对轨道衰减的影响,进而维持较长时间的高精度轨道。总之,平行理论抓住了星座演变的本质,再加上动力学短弧段整网自主定轨提供的最优解,本文提出的方法为导航星座的自主运行提供了一个有效的解决框架。

## 4 结 论

大型复杂星座的兴起给传统依靠地面测控方法带来了全新的挑战。本文综合运用传统地面测控方法和基于星座组网自主运行方法,提出了在平行系统理论下的大型

复杂星座自主运行框架,并给出仿真算例,表明相比单纯依靠星间观测的星座自主定轨,在平行系统框架下结合动力学短弧段伪逆平差法定轨具有更高的精度。结果表明,平行系统理论抓住了星座演变的本质,在平行进化中提高了模型参数、预报误差的精度,从而减弱其对轨道衰减的影响,为导航星座的自主运行提供了一个有效的解决框架。平行系统理论下的大型复杂星座自主运行框架仍有许多细节问题需要进一步探讨,这将是作者下一步研究的重点。

## 参考文献

- [1] 汪夏,任迪,汪明哲.论商业航天概念内涵及我国商业航天发展现状[J].卫星应用,2020,4(11):41-48.
- [2] 胡旖旎,钟江山,魏晨曦,等.美国“下一代太空体系架构”分析[J].航天器工程,2021,30(2):108-117.
- [3] 张轶男,许菁菁,袁俊,等.巨型星座发展与太空现代化治理[J].北京航空航天大学学报(社会科学版),2021,34(3):134-141.
- [4] 祝彬,郝雅楠,关晓红,等.全球商业航天发展态势及对我国商业航天的启示[J].军民两用技术与产品,2020,4(1):34-39.
- [5] ZHOU Y F, WANG Y K, HUANG W D, et al. Inorbit performance assessment of BeiDou intersatellite link ranging[J]. GPS Solutions, 2018, 22(4): 1-10.
- [6] SUN L Y, WANG Y K, HUANG W D, et al. Intersatellite communication and ranging link assignment for navigation satellite systems[J]. GPS Solutions, 2018, 22(2): 1-14.
- [7] 高贺,王玲,黄文德,等.北斗全球卫星导航系统境外星数据快速回传的路由优化方法[J].中国空间科学技术,2018,38(2):9-15.
- [8] 王威,高为广,唐成盼,等.卫星导航系统自主导航技术研究及验证[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2021,51(1):103-117.
- [9] 唐成盼,胡小工,周善石,等.利用星间双向测距数据进行北斗卫星集中式自主定轨的初步结果分析[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2017,47(2):95-105.
- [10] WANG F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: Concepts, architectures, and applications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(3): 630-638.
- [11] WANG F Y. Parallel control: A method for data-driven and computational control[J]. Acta Automatica Sinica(in Chinese), 2013, 39(4): 293-302.
- [12] WANG F Y, LIU D R, XIONG G, et al. Parallel control theory of complex systems and applications[J]. Complex Systems and Complexity Science (in Chinese), 2013, 9(3): 1-12.
- [13] 杨俊,范丽,明德祥,等.卫星导航地面试验验证的平行

系统方法[J]. 宇航学报, 2015, 36(2): 165-172.

- [14] 刘友红, 黄文德, 盛利元. 导航星座自主运行平行系统的轨道计算方法[J]. 宇航计测技术, 2015, 35(6): 14-18, 27.
- [15] 李灏霖, 王玲, 黄文德, 等. 导航星座整网自主定轨的动力学短弧段伪逆平差法[J]. 宇航学报, 2018, 39(8): 863-869.

#### 作者简介

**黄文德**, 博士, 主要研究方向为卫星导航系统及航天器轨道动力学。

E-mail: nn\_hwd@126.com

**贺达江**(通信作者), 教授, 从事输变电技术及电能质量治理等相关研究与教学工作。

E-mail: hdj202@163.com

**米贤武**, 教授, 主要研究方向为微电子与固体电子学。

E-mail: xianwumi@163.com

**杨玉婷**, 高工, 主要研究方向为卫星导航系统仿真与应用技术。

E-mail: 1426105643@qq.com

**张利云**, 硕士, 主要研究方向为卫星导航系统仿真与应用技术。

E-mail: 634032814@qq.com

**康娟**, 硕士, 主要研究方向为卫星导航系统仿真与应用技术。

E-mail: 15574978094@163.com

**李靖**, 硕士, 主要研究方向为卫星导航系统仿真与应用技术。

E-mail: 810868161@qq.com