



研究与开发

基于MBSE的低轨星座系统设计方法研究

张鹏^{1,2}, 王天舒¹, 马伟³, 张世杰^{2,4}, 赵祥天⁴, 赵亚飞⁴

- (1. 清华大学航天航空学院, 北京 100084;
2. 银河航天(北京)通信技术有限公司, 北京 100192;
3. 中国星网网络系统研究院有限公司, 北京 100160;
4. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要: 相比于传统的高轨高通量卫星和地面网络, 低轨卫星互联网具有显著的广覆盖、低时延、宽带化、低成本等特点和优势, 近年来各国均在积极布局, 且呈现出加速部署、快速迭代、不断演进的特征, 然而其急剧扩张的规模给系统设计和性能评估也带来挑战。通过对低轨星座系统的发展现状和基于模型的系统工程方法(MBSE)在相关领域的应用的调研, 分析了低轨星座系统设计论证的关键要素, 采用MBSE方法构建了星座系统的设计建模与评估流程, 进一步介绍了低轨星座系统数字化设计需要解决的关键技术, 最后讨论了相关方法在低轨星座系统设计上的应用前景。

关键词: 低轨星座系统; 基于模型的系统工程; 性能评估

中图分类号: TP393, TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025156

Research on the digital design of LEO constellation systems based on MBSE

ZHANG Peng^{1,2}, WANG Tianshu¹, MA Wei³, ZHANG Shijie^{2,4}, ZHAO Xiangtian⁴, ZHAO Yafei⁴

1. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China
2. YinheHangtian (Beijing) Telecommunication Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China
3. China StarNet Network System Research Institute Co., Ltd., Beijing 100160, China
4. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Compared to traditional high-throughput satellites and ground networks, low earth orbit (LEO) satellite Internet offers significant advantages such as wide coverage, low latency, broadband capacity, and cost-effectiveness. In recent years, countries worldwide were actively deployed LEO constellation systems, and were characteristics of accelerated deployment, rapid iteration, and continuous evolution. However, the rapid expansion of these systems also posed elaborated challenges for system design and performance evaluation. Through the investigation of the development status of LEO constellation systems and application of model-based system engineering (MBSE) in relevant

收稿日期: 2025-02-19; 修回日期: 2025-03-28

通信作者: 张世杰, zsj@yinhe.ht



fields, the key elements of their design were elaborated, then a MBSE process to construct the design model of constellation systems along with the performance evaluation was demonstrated. Additionally, the key technologies that need to be addressed in LEO constellation system design was discussed. Finally, the application of relevant methods in the design of LEO constellation systems was prospected.

Key words: LEO constellation system, MBSE, performance evaluation

0 引言

近年来,各国都在积极布局低轨卫星星座系统,Starlink、OneWeb、Kuiper等星座计划加速推进,国内低轨卫星互联网建设也取得关键突破,全球掀起了以低轨巨型星座为代表的卫星互联网建设热潮^[1]。不同于20世纪90年代的铱星等全球性系统,本轮低轨星座系统呈现出巨型化、宽带化、星间组网的特点,其建设也具有批量部署、快速演进的特征,Starlink、OneWeb均多次向电信主管部门提交频轨网络资料调整申请,一方面是占频保轨的需要,另一方面是星座建设和应用的需求迭代。低轨卫星互联网通常按功能可分为空间段、地面段、应用段,空间段即低轨星座系统。目前已有大量关于卫星互联网体系、架构、关键技术的研究^[1-2],关于低轨星座的设计也有数十年的积累^[3],而面向低轨星座系统,即空间段的设计,需要考虑更多工程实现、星座组网、服务应用的问题,针对低轨星座系统的方案论证、设计方法尚缺乏全面综合的分析。

“十四五”以来,数字化、模型化技术的发展应用与制造业以前所未有的广度和深度加速融合,深刻影响了产品的研发与制造模式,基于模型的系统工程、数字主线、数字孪生、大数据等技术蓬勃发展,已深入且广泛地应用到产品研制过程中,被认为是目前解决巨型复杂系统问题的最有效手段之一。而低轨星座系统是典型的复杂系统,需要多部门共同建设,数字化协同需求迫切。本文尝试在梳理低轨星座系统设计流程和内容的基础上,采用基于模型的系统工程(MBSE)

方法进行低轨星座系统的系统数字化建模和性能评估,实现对低轨星座的技术状态基线管理、快速变更影响分析、需求与指标全过程追溯,支撑巨型星座网络的设计、建设和运维。

1 低轨星座系统发展与数字化设计现状

SpaceX公司正在加快部署由约4.2万颗低轨卫星组成的巨型互联网星座^[4],截至2025年3月,已发射部署8 085颗卫星,多数为600 km以下的倾斜圆轨道,生产超过460万台用户终端,在全球近118个国家和地区提供卫星互联网覆盖服务,在大部分地区可以提供100 Mbit/s的下载速率和10 Mbit/s的上传速率,时延在40 ms左右^[5-7]。

OneWeb目前已完成一期星座634颗卫星的部署,其服务已扩展到整个欧洲地区和美国大部分地区,并逐步从北半球部分地区向全球提供高速低时延卫星网络服务^[8]。2023年8月12日,加拿大通信公司Telesat^[9]宣布与加拿大航天技术公司MDA签订合同,推进总数为198颗的低轨卫星网络项目,并计划2026年年中启动首次发射,2027年启动极地和全球服务。国内低轨卫星互联网产业也迅速发展,2021年4月,国家成立了中国卫星网络集团公司,统筹发展通导一体低轨星座网络^[10],2023年下半年,中国通过3发火箭发射任务,成功将多颗卫星互联网技术试验卫星送入轨道,低轨星座进入组网部署阶段^[11]。银河航天在2022年3月成功发射6颗批产低轨通信卫星,与银河航天首发星共同组建了我国首个“低轨宽带通信试验星座”。银河航天于2024年5月在泰国进行低轨卫星互联网宽带通信网络的试验验

证,率先实现中国低轨宽带卫星互联网出海,并在2025年2月10日,与泰国主要运营商 True Corporation Public Company Limited 达成合作,未来将在低轨卫星通信技术、天地一体化网络解决方案等领域开展深入交流,不断推进低轨卫星互联网的建设与应用。

1.1 低轨星座系统设计特点和挑战

尽管低轨星座系统具有众多优势,但其庞大的卫星数量和复杂的应用场景为星座需求分析、功能架构设计、性能分析评估带来诸多挑战。具体表现在以下几方面。

(1) 设计要素多:低轨卫星星座系统卫星数量庞大,动辄上千颗乃至上万颗,是涉及多系统、多专业领域、多业务交织的巨型复杂系统,相关接口方众多、业务场景多样复杂、需求交叉度高。

(2) 系统动态强:低轨星座系统星间链路、星地链路动态变化,多种业务需求动态变化,在建设之前必须对系统的总体设计方案和各种关键技术进行充分的分析建模论证,迫切需要高效的设计验证手段,支持方案快速迭代。

(3) 运行周期长:星座系统通常需要分阶段部署建设,且一旦建成将持续运维,并根据应用需求补网演进、卫星更迭,因此在星座设计之初就需要有全生命周期的视角,保证星座系统的扩展性。

1.2 MBSE 在星座系统设计中的应用

航天领域面对复杂系统,通常采用系统工程方法进行分层分级的设计、开发、研制,其中涉及大量的接口传递和一致性验证,传统的基于文档的系统工程中,设计过程分散到各个设计报告中,存在着命名不统一、接口不一致、系统迭代周期长、更改影响评估、验证追溯困难等问题。而 MBSE 通过对传统系统工程继承和创新发展,以及规范化的论证推演,开展低轨星座系统的正向设计与验证,贯穿概念设计、系统开发、系统

研制、系统运行运营的全生命周期,可为全生命周期的系统需求、分析、设计、验证提供支撑,提高系统研制协同水平和效率。

基于模型的系统工程是采用系统建模语言(system modeling language, SysML),通过形式化的建模手段,从8类视图(活动图、序列图、状态机图、用例图、需求图、模块定义图、内部模块图、参数图)来描述系统的需求、结构、行为,支持系统需求、设计、分析、验证、确认活动,实现设计师之间的高效沟通。根据方法论的不同,数字化设计流程会略有差异,有的是面向对象的,有的是由场景驱动的,而有的是按照问题域和解决方案域划分的,但其典型过程基本都包括需求分析、功能分析、逻辑细化、解决方案定义、指标分析过程。

美国航空航天局(NASA)在多项卫星任务中采用基于模型的系统工程方法,包括国际空间站材料试验项目(MISSE-X)的接口确认和控制^[12]。欧美航空航天企业,如洛马公司、波音公司、泰雷兹公司等也纷纷在型号研制中推行 MBSE^[13]。美国军方正在推动将数字技术引入其行动的各个方面,包括数字工程。在最新的通信卫星招标中,航天发展局要求承包商提交其卫星的数字模型,以便该机构建立星座系统模型。Anyanhun^[14]基于 MBSE 模型开展星间通信系统的设计,包括系统行为、架构和参数设计。Duffy^[15]也在地月空间的星座研究中采用了 MBSE 方法进行需求分析、架构设计、性能评估。Guariniello 等^[16]将人工智能和 MBSE 方法结合起来,用于提高星座设计的自动化程度。相比之下,国内近年来才兴起低轨星座系统的建设,与之相关的 MBSE 研究比较有限,但我国在载人航天、卫星通信系统研制中已推行多年 MBSE,为立项论证、顶层设计、工程建设提供有力支撑^[17,19],相关的经验可以为 MBSE 在低轨星座系统中的应用提供参考。



2 低轨星座系统设计和要素

星座系统的设计始于需求,通过对需求的管理来管控研发的技术过程,并通过对需求的分析完成低轨星座系统架构的建模,完成正向设计。按照系统过程方法和星座系统要素,开展系统顶层建模、能力分析、网络架构设计、构型设计、部署维持设计。同时,围绕星座构型设计、覆盖特性分析、构型维持策略、性能评估验证等关键环节开展性能分析与仿真工作,验证系统设计的正确性,实现敏捷设计和快速响应,低轨星座系统设计流程如图1所示。

2.1 低轨星座系统需求分析

低轨星座系统的设计源于对业务需求和应用场景的深入理解,不同的需求会导致完全不同的设计方案,因此,在星座系统设计之初,首先要开展低轨星座业务场景和需求分析,以及相关方的辨识。

(1) 根据星座建设目标,对宽带通信、移动通信、导航增强等服务需求进行深入的调研和评估,针对每一类场景提供详细的业务流程和功能描述,制定合理的技术指标,进而形成完整的需求文档。

(2) 低轨星座涉及的利益相关方包括运载火箭、发射场、地面系统、应用系统等,在需求分析阶段,对相关方进行全面的分析,明确低轨星座的

外部接口关系以及相关方对低轨星座系统的要求。

2.2 顶层能力和组成设计

在确定星座设计需求后,对低轨星座系统的各项能力进行分析设计,包括以下几点。

(1) 覆盖能力:根据业务需要确定低轨星座对不同业务的覆盖能力,包括覆盖范围、覆盖重数、覆盖持续时间等指标。

(2) 组网能力:分析低轨星座的组网结构和组网方式,包括卫星数量、轨道参数、载荷配置、星间链路、地面链路等要素。

(3) 自主运行能力:分析低轨星座系统的自主运行机制和策略,包括星座的构型维持、轨道控制、碰撞规避、故障诊断与恢复等方面。

(4) 通信和导航等典型服务能力:分析低轨星座系统提供的通信与导航服务性能和质量,包括数据传输速率、数据传输时延、定位精度、定位可用性等指标。

在此基础上,对低轨星座系统的架构、组成、网络拓扑进行设计,初步确定星座规模,对星地链路(包括馈电链路、用户链路)、星间链路进行规划,包括星地链路需要考虑的干扰规避策略。

2.3 星座系统关键参数设计

2.3.1 星座构型与部署维持设计

星座构型是低轨星座系统中关键的设计参

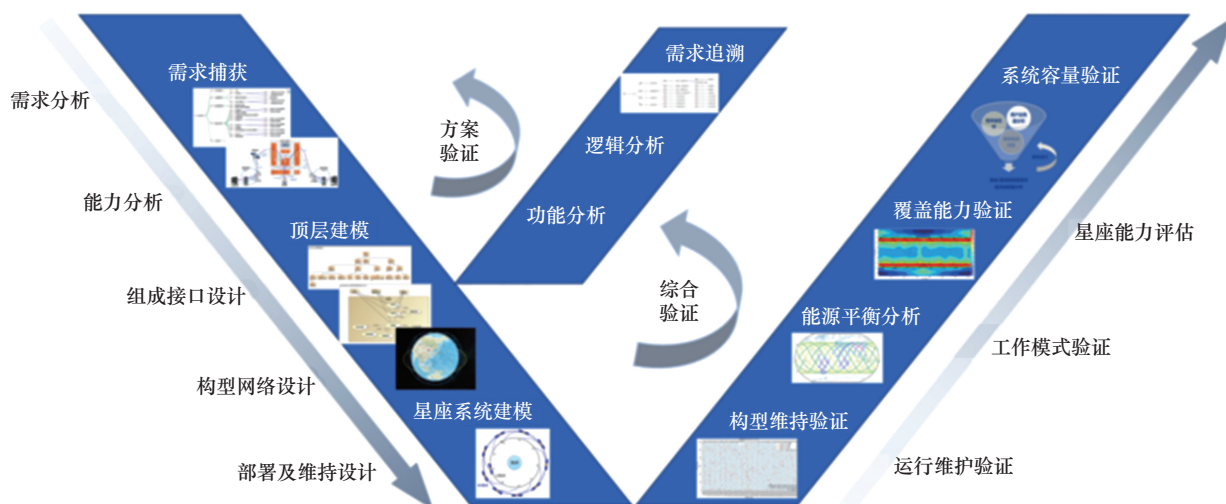


图1 低轨星座系统设计流程

数,对星座性能、成本、单星研制有直接的影响。以常用的Walker构型^[20]为例,优化设计参数包括卫星数目 N 、轨道面数 P 、相位因子 F 。在设计阶段需要结合任务需求和约束进行多轮迭代和优化。与星座构型紧密相关的还包括星座发射组网、构型保持、补网离轨等方案。

(1) 星座发射部署方案:这是根据星座的总体构型,卫星的数量、类型,以及运载火箭的性能、数量、发射场位置等条件,确定最优的卫星发射计划和策略,以实现星座的高效部署。例如,Starlink在不同阶段采用不同的部署策略,一期的壳层轨道面数多,而面内卫星少,采用的是单次部署多个轨道面并逐渐加密的策略^[21],而二期系统大多轨道面数少,而面内卫星多,因而采用的是对面内卫星逐步加密的方式进行部署的^[5]。

(2) 星座组网方案设计:这是根据星座的业务需求,确定最优的星地/星间节点组网方式和网络拓扑结构,以实现星座高效、可靠、灵活的数据传输。

(3) 星座补网方案设计:这是根据卫星失效后对星座服务质量和网络安全性的影响,确定最优的卫星替换计划和策略,以实现星座的快速恢复和完整维持。此外,某些星座会通过分阶段部署的策略来逐步扩大容量,以最大限度地降低诸如发射失败和市场不确定性之类的偶然风险,需要设计合理的性能台阶,确定补网策略。

(4) 星座构型保持设计:这是根据星座的服务需求,确定最优的卫星构型维持方式、方法、参数,以实现星座的稳定运行和高效服务。

(5) 卫星离轨方案设计:这是根据卫星的任务周期、轨道高度、质量和形状等参数,以及太阳活动的周期变化、大气密度的变化等环境因素,确定最优的卫星离轨时间、方式、轨道,以实现卫星的安全退役和空间环境保护。

2.3.2 工作模式和业务流程设计

不同业务的工作模式以及业务流程设计建

模,旨在根据低轨星座系统的应用目标和应用场景,确定星座系统的工作状态、工作参数和工作流程,实现卫星系统的高效、可靠和灵活的数据服务。其中,应用目标决定了星座系统的主要功能和性能指标,以及星座系统与其他相关系统之间的接口关系。而应用场景决定了星座系统在不同服务业务下的工作模式,以及卫星系统与用户终端之间的通信方式和协议。

以宽带通信为例,根据星座系统与地面网络的关系,可将星座系统的工作模式分为天星地网、天基网络和天网地网3种模式^[22]。针对具体的工作模式,需要对终端接入、馈电切换、星间建链、宽带业务传输的流程进行详细设计。

针对馈电切换,由于低轨卫星相对于地面的高速移动性,低轨卫星在通信过程中将发生大量的切换,其中包括卫星到信关站的馈电链路切换。因此,需要对馈电切换行为进行设计。馈电切换流程如图2所示,采用时序视图开展馈电切换设计。

以低轨导航增强为例,提供的可导航信息增强服务、天基全球监测服务、快速精密定位服务等不同的服务模式,在不同应用场景下对应不同的工作流程,在设计阶段需要进行明确。

2.4 低轨星座系统性能评估

低轨星座系统性能的评估与用户需求高度关联,星座系统关键参数的确定需要经过性能评估环节,确认满足设计指标后方能进入下一设计环节,做到需求与指标的全过程追溯。目前尚无完整的性能评估体系,相关研究多侧重于单一指标的仿真方法,戴成伟^[23]从覆盖性能、通信容量、通信质量、可靠性、系统成本等方面初步构建了低轨通信星座的指标体系,可以作为通信星座指标体系的参考。其中,每一项指标又可进一步拆分。以覆盖性能为例,包括覆盖重数、最低通信仰角、连续通信时间、重访间隔等,需要结合具体的业务进行仿真评估。

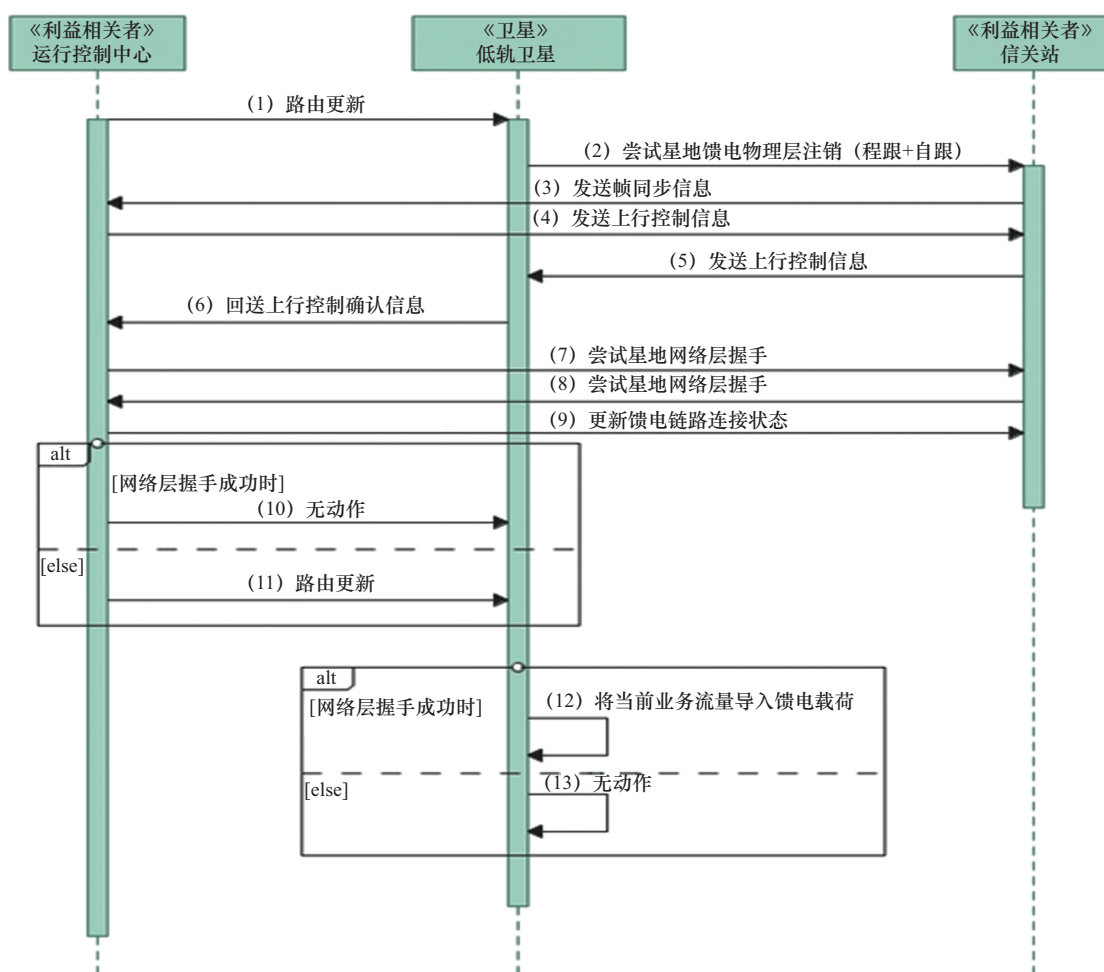


图2 馈电切换流程

(1) 覆盖重数：指在任意时刻，关注区域内有多少颗卫星可见，反映了星座对地覆盖的密度和均匀度。

(2) 最低通信仰角：指在任意时刻，关注区域内与通信卫星之间的最小仰角，反映了星座对地覆盖的质量和可靠性。

(3) 连续通信时间：指在任意时刻，关注区域内与某一颗卫星之间的通信持续时间，反映了星座对地覆盖的稳定性和连续性。

(4) 重访间隔：指在任意时刻，关注区域内被同一颗卫星或不同卫星连续覆盖的时间间隔，反映了星座对地覆盖的频率和灵活性。

以覆盖重数为例，某低轨倾斜轨道星座为具备对中低纬度区域良好的覆盖性。在卫星对地覆

盖半锥角为 55° 情况下，该星座可实现南北纬 67° 内的连续无缝覆盖，对于 $30^\circ\sim 60^\circ$ 区域，形成优势覆盖。星座全区域纬度带覆盖性如图3所示。

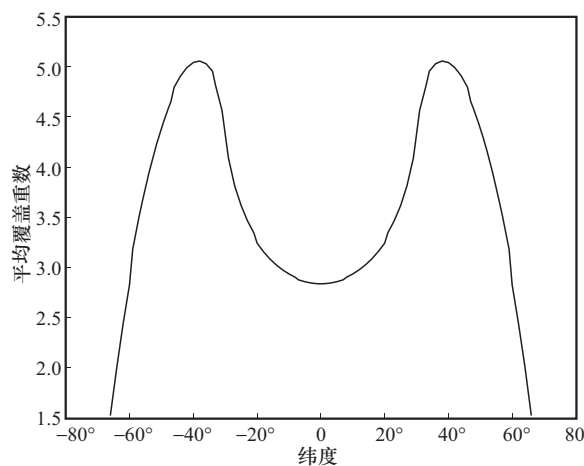


图3 星座全区域纬度带覆盖性

3 低轨星座的数字化设计框架

如前所述, MBSE支持与复杂系统开发相关的需求、设计、分析、验证、确认, 提供了基于文档的系统工程不能提供的优势。采用数字化手段进行低轨星座系统设计, 将以文档形式描述的各类工程信息和知识体系数字化模型化, 建立卫星星座系统知识模型体系, 可以实现各类设计信息的统一管理和维护, 使沟通交流更加高效。本文针对低轨星座系统的设计工作, 采用MBSE设计方法和SysML语言, 按照MagicGrid方法论, 低轨星座系统数字化设计模型框架如图4所示, 从需求、行为、结构、参数、可靠性5个维度, 开展低轨星座系统从问题域到解决域的分析、设计, 形成基于模型的低轨星座系统设计开发流程、低轨星座数字化模型、低轨星座内外接口分析和性能指标验证, 其中可靠性部分主要进行星座失效模式和影响分析(failure mode and effect analysis, FMEA)。

3.1 星座顶层能力(问题域)

在问题域中, 项目侧重对星座顶层能力的建模, 用活动图ACT和块定义图BDD对星座功能、组成进行初步划分, 用内部块图IBD和表的形式梳理出星座的外部环境和外部接口, 因此又叫作星座顶层能力建模。

(1) 以用户需求为驱动, 重点分析输入和输出接口关系。支持用户需求黑盒建模, 从空间段需求整体出发, 描述系统的功能需求及各业务剖面与外界接口关系。支持星座运行过程的顶层能力分析, 使用SysML相关视图, 如用例图、活动图、序列图、状态机图等来描述典型场景。

以星座运行维护场景为例, 在已有工程任务经验的基础上, 通过顶层分析确定低轨星座任务所涉及的关键服务需要。运行维护场景分析如图5所示, 整个分析过程采用了场景用例分析视图, 表达出运行维护场景分析结果, 模型表达上

采用了利益相关方元素来承载S频段测控网、地面段等利益攸关方, 通过关联关系表明与星座运行维护的联系。

(2) 支持系统顶层功能域划分, 描述其内部组成, 进行子系统结构、关键行为、关键系统约束、属性等建模。

(3) 支持通过任务需求开展系统功能分析建模, 建立活动图, 并执行仿真验证。

(4) 支持系统架构建模, 基于顶层能力分析开展系统逻辑架构建模, 建立系统顶层块的定义图, 进行组成关系定义, 并通过关联的内部块图表达数据流、控制流在各个子系统之间的流动关系。

(5) 支持形成系统外部接口的黑盒接口控制文件(ICD), 并可以为后续分系统设计提供功能要求和接口约束。低轨星座系统外部接口关系如图6所示, 采用IBD图给出了低轨星座系统和外部相关系统的接口关系。

3.2 星座系统设计(解决域)

在解决域中, 将从星座的构型参数分析出发, 用活动图ACT表示出星座发射、组网、补网、离网等生命周期各阶段, 以此为主线, 使用活动图ACT、状态机图STM等图分析各阶段特有的服务流程和维护流程, 根据不同设计方案进行参数权衡, 汇总出星座内部逻辑IBD和接口表, 即进行星座系统设计建模。

(1) 支持定义系统逻辑设计的精确模型, 解决域中提供多个解决方案, 通过执行多方案的权衡分析选择最优方案进行实施。

(2) 支持综合运用活动图、块图、内部块图、状态机图、时序图、参数图对问题域模型进一步自顶向下细化和分解。包括支持使用状态机分析系统不同状态下的转换等。

(3) 支持对相关仿真工具进行集成, 包括Mworks、MATLAB、专用工具等, 通过消息总线的方式进行联合系统级仿真验证和分析, 对构型维持、覆盖特性、构型优化3个方面相关参数

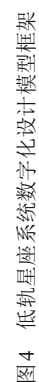


图4 低轨星座系统数字化设计模型框架

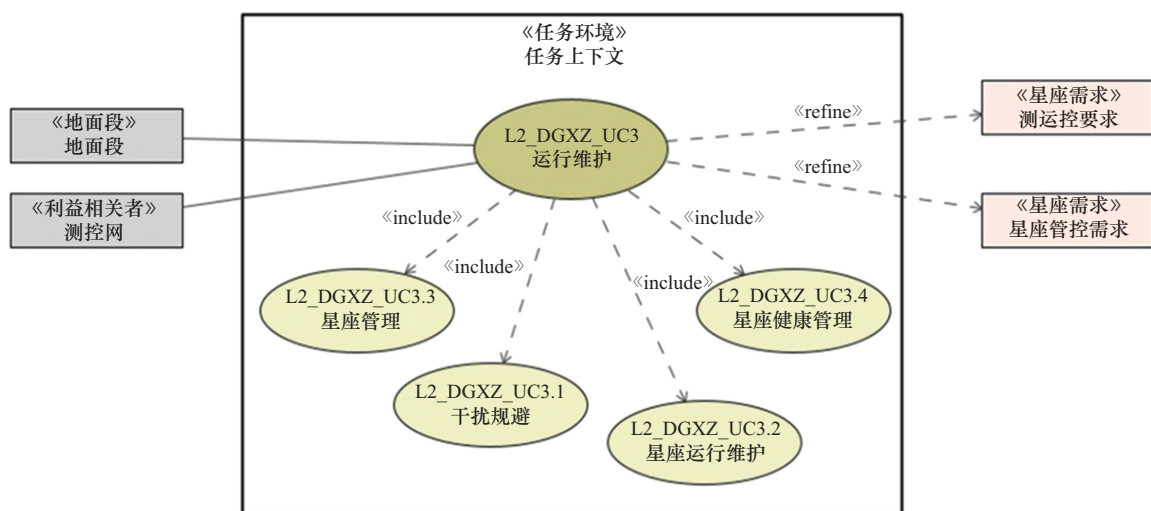


图5 运行维护场景分析

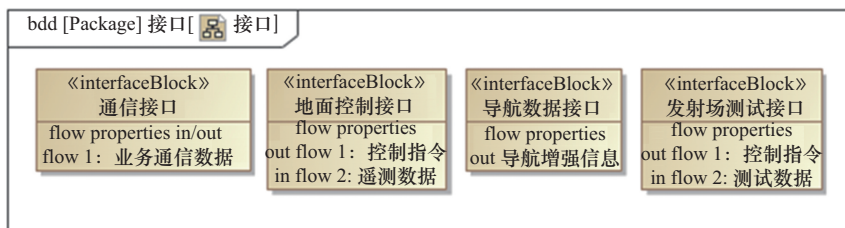
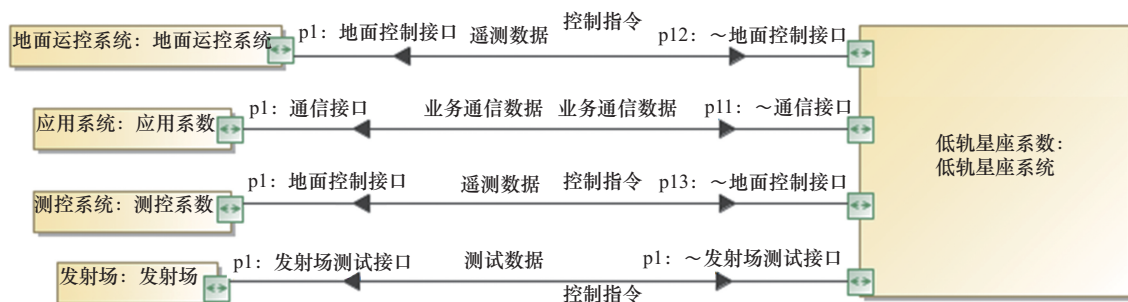


图6 低轨星座系统外部接口关系

开展仿真分析，借助对外部仿真结果的读取、调用，得到多种方案的数据，并结合约束对方案结果进行筛选，完成性能评估。在解决域，还需要对分系统的接口进行定义，形成系统内外部接口的白盒接口控制文件（ICD）。

4 低轨星座设计需要解决的关键技术

4.1 低轨星座设计仿真模型协同技术

根据第2部分所述的低轨星座设计流程，首

先基于MBSE的方法论，开展低轨星座系统需求分析、业务场景分析、功能架构和能力分析与建模，然后围绕星座构型维持、覆盖特性分析、系统容量分析等关键环节开展性能分析与仿真验证工作，最后完成设计方案的闭环。

考虑当前新型低轨星座的快速演进和迭代，采用模型驱动的方法，通过消息总线将数字化设计软件和性能评估验证平台打通，实现设计模型与仿真模型的高效协同和设计方案的快速迭代。



平台提供接口定义、参数发布订阅、数据格式解析等服务,实现了轨道维持、星座覆盖、通信容量等验证场景参数和评估指标的完整发送与接收。

协同验证过程中,星座设计 SysML 模型根据行为图或参数图离散地向仿真模型进行设置,启动仿真后快速向仿真模型提供输入数据,然后由外部仿真模型处理后返回仿真结果。以 Magic-Draw 软件为例,支持 STK 仿真模型的集成^[24]。

4.2 考虑工程约束的星座构型设计与维持

星座构型是典型的多目标优化问题,其设计变量主要是星座构型参数。设计约束来自卫星平台、载荷要求、发射部署要求、星间组网要求,有的是直接约束,有的是间接约束。设计目标通常包括卫星数目最小(成本最低)或综合性能(服务性能、鲁棒性、部署维护成本)最优等。

阮永井等^[3]从星座的任务需求、覆盖特性、摄动补偿、备份策略等方面综述了星座的构型设计方法及其特点。为了保证环境摄动力作用下星座构型的稳定性,低轨巨型星座系统多采用相同轨道高度和相同倾角的同构圆轨道进行设计,包括 Walker 星座和极轨星形星座^[25-26]。Walker 星座各轨道平面平均分布在 360° 范围内,而且轨道平面中的卫星均匀分布,具有良好的全球覆盖特性。极轨星形星座轨道倾角接近 90° ,通常采用 SOC 覆盖带方法进行设计,适用于全球覆盖的场景。关于 Walker 星座构型的设计优化,国内外有大量的相关研究,Lang^[27]采用 Walker 星座构型分析了纬度带覆盖的需求,并优化了卫星数量。大量研究从星座规模和覆盖性能优化的角度上进行

设计^[28],实际上,星座构型设计还需要考虑多种工程约束。

(1) 运载能力约束:由于火箭运力和发射场位置对部署方案有直接的影响,因此在星座构型论证时需要兼顾运载能力,尽可能完成同轨道面部署,提高组网效率。

(2) 地面跟踪约束:对于低轨通信星座,在满足多重覆盖的同时,对地面终端的最低通信仰角会有一些的要求,需要结合具体的跟星策略(如距离最近、仰角最高、通信时长最长)分析是否满足仰角约束。有时为了简化地面的跟踪,还可采用地面重轨迹星座或链式星座^[29-30]。

(3) 星间碰撞与建链约束:在选定星座规模和基本构型参数后,通常需要结合星间碰撞和通信终端的能力约束,对相位因子进行局部优化。不同的相位因子下星间链路建链特性不一样,通常从系统设计角度对星间通信距离有约束,考虑通信链路方向角的变化范围,从卫星构型布局角度施加约束,选取方向角变化范围尽量小的建链方案。星座相位因子设计建模如图 7 所示,这是基于碰撞距离的相位因子优选方法在 MBSE 设计模型中的建模示例,设计模型将轨道数、面内卫星数、轨道倾角、高度传递进 MATLAB 程序,进而生成最佳相位因子。

构型维持是星座运行控制的重要任务。由于低轨星座多采用同构轨道,多采用相对构型维持策略,可以降低控制频次,节省燃料消耗^[31]。张大鹏等^[32]基于 SpaceX 公司发布的精密星历分析了星链卫星轨道维持控制策略和碰撞规避的策略,在太阳活动高年,单星平均控制周期不到

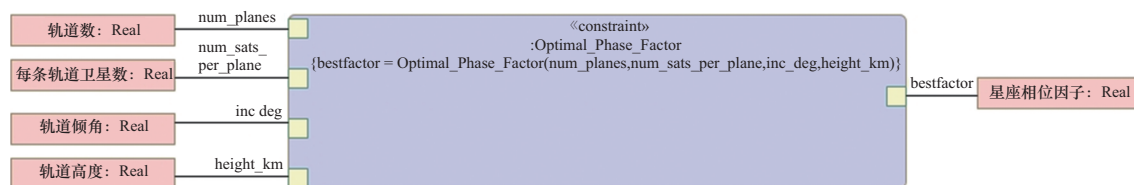


图7 星座相位因子设计建模

0.8 天, 对卫星的自主控制提出了较高要求。假设星座内卫星相角和升交点赤经的允许漂移范围分别为 $[-\varepsilon_\lambda, \varepsilon_\lambda]$ 、 $[-\varepsilon_Q, \varepsilon_Q]$, 第 i 颗星达到相位漂移边界时, 使得其在 ΔT 时间后再次超出允许范围(控制周期)。

$$\begin{bmatrix} \Delta a \\ \Delta i \end{bmatrix} = -A^{-1} \begin{bmatrix} \frac{2\varepsilon_Q}{\Delta T} \\ \frac{2\varepsilon_\lambda}{\Delta T} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, 由摄动方程可知半长轴偏差 Δa 和轨道倾角 Δi 偏差对相位变化率和升交点赤经的近似传递关系为:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{7\Omega_1}{2a} & -\frac{\sin i \Omega_1}{\cos i} \\ -\frac{7\Omega_1}{2a} - \frac{3n}{2a} & -\frac{6J_2 R_e^2}{a^2} n \sin 2i \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于不同的构型策略, 本文定义了 6 项指标作为控制策略“优劣”的评判标准, MBSE 建模工具通过参数图的形式进行方案优选。

(1) 切向平均需控次数。该指标统计了仿真时长内平均每颗卫星进行相位—高度联合维持所进行的切向控制次数。该数值越小, 则表明相位—高度控制频次越低。

(2) 法向平均需控次数。该指标统计了仿真时长内平均每颗卫星进行升交点赤经维持所进行的法向控制次数。该数值越小, 则表明升交点赤经控制频次越低。

(3) 切向控制最大重叠度。该指标统计了仿真时长内同时进行切向机动的最大卫星数目。该数值越小则表明同时进行切向机动的卫星数目越小, 星座越容易管控。

(4) 法向控制最大重叠度。该指标统计了仿真时长内同时进行法向机动的最大卫星数目。该数值越小则表明同时进行法向机动的卫星数目越小, 星座越容易管控。

(5) 切向平均推进时长。该指标统计了仿真时长内平均每颗卫星切向推进时长。该数值表明

卫星的燃料消耗量, 数值越小, 则每颗卫星的切向推力器燃料消耗越小。

(6) 法向平均推进时长。该指标统计了仿真时长内平均每颗卫星法向推进时长。该数值表明卫星的燃料消耗量, 数值越小, 则每颗卫星的法向推力器燃料消耗越小。

4.3 低轨星座系统快速性能评估技术

覆盖、容量、时延是低轨星座系统关注的几个核心指标, 下面分别阐述。

星座覆盖性能是星座构型设计、卫星载荷选择、部署方案确定的重要依据, 对于包含数千颗乃至数万颗卫星的巨型星座系统, 需要寻找更有效的覆盖性能分析方法, 从而能够在保证计算精度的同时快速获得星座性能分析结果。星座的覆盖性能通常采用地面网格离散后分析统计的方法进行计算, 对于规模庞大的巨型星座和全球覆盖的需求, 计算量巨大, 可以采用基于区域边界判断可见性然后计算覆盖窗口^[33]和均匀撒点的方式(相较于经度、纬度等间隔撒点), 提高元任务计算效率, 同时适当采用遗传算法等优化方法^[34], 提高覆盖性评估时效。

通信容量是低轨通信星座系统服务能力的重要指标, 在星座系统论证中尤为关键。对于卫星网络, 依据仿真目的和颗粒度不同, 包括链路级仿真、网络级仿真、体系级仿真。在系统设计阶段, 需要在星座构型、载荷配置、星间链路拓扑、信关站布局、路由策略、馈电选择、终端接入策略的基础上, 结合具体的工作模式, 模拟数据流在仿真单元之间的传输, 进而评估整网的通信容量, 更多是体系级的仿真。Inigo 等^[35-36]分析了 Starlink、Oneweb、Telesat、Amazon 4 个星座系统的容量, 并考虑了信关站部署、用户接入、星间链路的影响。Wang 等^[37]考虑了链路丢包率和星座规模对星座容量的影响, 以及影响容量的瓶颈。Sedin 等^[38]通过计算单颗卫星覆盖范围内的小区数量、点波束带宽、卫星频谱效率,



实现了对星座容量的定量评估。这些是不采用星间链路的星座容量计算常用的方法,即通过单波束容量计算单星通信容量,进而实现星座的容量计算。当采用星间链路时可采用最小代价最大流方法,对星座网络进行建模,求解网络图中的前向最大流和返向最大流,即得到前向容量和返向容量^[39]。

低时延是低轨通信星座的优势,也是通信服务的重要指标。为了准确评估星座系统的时延,往往需要结合具体的网络通信协议进行仿真^[40],在初步设计时,可以按照空间传输时延和处理转发时延对星座系统时延进行简单评估,以此确定星间建链拓扑、信关站布局等系统设计要素^[39]。Handley^[41]采用仿真的方法比较了空间网络和地面网络的时延,得出了在3 000 km以上距离采用空间网络具有时延优势的结论。

以上提到的覆盖、容量、时延性能均可以通过MBSE设计模型提供输入参数,在仿真平台中在线求解,然后反馈到设计回路中进行星座系统设计的优化。

5 结束语

本文总结了低轨星座系统近年来的应用进展,梳理了低轨星座系统设计的一般流程和设计内容,研究了基于模型的低轨星座系统设计方法,该方法覆盖了低轨星座系统需求分析、功能架构设计、方案分析验证的全过程,形成可指导及支撑系统设计和工程建设的系统快速设计和迭代的能力。

通过采用基于模型的系统工程方法,建立星座系统需求、各卫星需求间的追溯关系,同时明确需求模型、设计模型、仿真验证模型间的关系及追溯,将需求产生的源头、分解的过程、验证的结果完整地映射到数字化模型中,形成代表低轨星座系统下卫星、链路、拓扑的参考基线,供工程总体、卫星系统设计师协同使用,以数字化

手段加速低轨星座设计迭代,从而加速我国卫星互联网建设的步伐。

随着低轨星座系统规模的不断扩大,传统框架下的需求分析、功能设计、性能分析将愈加难以实现。依靠数字化手段的MBSE方法将建立卫星星座系统模型体系,通过数字化方式实现信息的统一维护与管理,进而大大提升对大规模复杂系统的分析效果。因此,在未来,随着面向低轨复杂系统的MBSE方法的不断成熟,低轨巨型卫星系统将获得更快响应和更准确的估计。

参考文献:

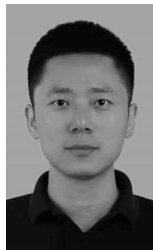
- [1] 李峰,禹航,丁睿,等.我国空间互联网星座系统发展战略研究[J].中国工程科学,2021,23(4):137-144.
LI F, YU H, DING R, et al. Development strategy of space Internet constellation system in China[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4): 137-144.
- [2] 孙晨华,庞策.低轨卫星互联网体系和技术体制研究发展路线思考[J].无线电通信技术,2021,47(5):521-527.
SUN C H, PANG C. Thoughts on the research and development route of the LEO satellite Internet system and technology system[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(5): 521-527.
- [3] 阮永井,胡敏,云朝明.低轨巨型星座构型设计与控制研究进展与展望[J].中国空间科学技术,2022,42(1):1-15.
RUAN Y J, HU M, YUN C M. Advances and prospects of the configuration design and control research of the LEO mega-constellations[J]. Chinese Space Science and Technology, 2022, 42(1): 1-15.
- [4] 刘旭光,钱志升,周继航,等.“星链”卫星系统及国内卫星互联网星座发展思考[J].通信技术,2022,55(2):197-204.
LIU X G, QIAN Z S, ZHOU J H, et al. Thinking on the development of “starlink” satellite system and domestic satellite Internet constellation[J]. Communications Technology, 2022, 55(2): 197-204.
- [5] KULU E. Satellite constellations—2024 survey, trends and economic sustainability[C]//Proceedings of the International Astronautical Congress. [S.l.:s.n.], 2024: 14-18.
- [6] MOHAN N, FERGUSON A, CECH H, et al. A multifaceted look at starlink performance[EB]. 2023: 2310.09242.
- [7] MA S M, CHOU Y C, ZHAO H Y, et al. Network characteristics of LEO satellite constellations: a starlink-based measure-

- ment from end users[C]//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2023 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-10.
- [8] PRITCHARD-KELLY R, COSTA J. Low earth orbit satellite systems[J]. *Journal of Telecommunications and the Digital Economy*, 2022, 10(1): 1-22.
- [9] VÁZQUEZ FRÍAS I. Study of the benefits and applications of LEO (Low Earth Orbit) for Communications and definition of space new business models. Case study: Telesat[D]. Barcelona, Spain Universitat Politècnica de Catalunya, 2022.
- [10] 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.
- YU B G, WU Z Q, WU C L, et al. Research and in-orbit experimental validation of LEO-based navigation augmentation system of Tianxiang-1 mission[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2022, 9(1): 25-34.
- [11] 中国政府网. 我国成功发射卫星互联网技术试验卫星[EB]. 2023.
- Chinese Government Website. China launches new satellite to test internet technologies[EB]. 2023.
- [12] VIPAVETZ K, SHULL D T A, INFELD D S, et al. Interface management for a NASA flight project using model-based systems engineering (MBSE)[J]. *INCOSE International Symposium*, 2016, 26(1): 1129-1144.
- [13] WANG W Y, HOU J J, MAO Y X, et al. Application and development of MBSE in aerospace[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2235(1): 012021.
- [14] ANYANHUN A I. Model-based (MBSE) system architecture development for a hybrid inter-satellite communication system[D]. Greensboro, NC, USA: North Carolina Agricultural and Technical State University, 2018.
- [15] DUFFY L. Cislunar system of systems architecture evaluation and optimization[D]. Fort Collins, CO, USA: Colorado State University, 2023.
- [16] GUARINIELLO C, MOCKUS L, RAZ A K, et al. Towards intelligent architecting of aerospace system-of-systems[C]//Proceedings of the 2019 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-11.
- [17] 张柏楠, 戚发轫, 邢涛, 等. 基于模型的载人航天器研制方法研究与实践[J]. *航空学报*, 2020, 41(7): 023967.
- ZHANG B N, QI F R, XING T, et al. Model based development method of manned spacecraft: Research and practice[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(7): 023967.
- [18] 李文屏, 白鹤峰, 赵毅, 等. 基于 MBSE 的卫星通信系统建模与仿真[J]. *天地一体化信息网络*, 2021, 2(1): 69-74, 80.
- LI W P, BAI H F, ZHAO Y, et al. Modeling and simulation of satellite communication system base on MBSE[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2021, 2(1): 69-74, 80.
- [19] 廖灿, 赵天, 冯旭, 等. 基于 SysML 的卫星通信系统设计与验证研究[J]. *天地一体化信息网络*, 2021, 2(3): 81-88.
- LIAO C, ZHAO T, FENG X, et al. Research on satellite communication system's design and verification based on SysML[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2021, 2(3): 81-88.
- [20] LANG T J, ADAMS W S. A comparison of satellite constellations for continuous global coverage[C]//Mission Design & Implementation of Satellite Constellations: Proceedings of an International Workshop Dordrecht: Springer Netherlands, 1998: 51-62.
- [21] 薛文, 胡敏, 阮永井, 等. 基于 TLE 的 Starlink 星座第一阶段部署情况分析[J]. *中国空间科学技术*, 2022, 42(5): 24-33.
- XUE W, HU M, RUAN Y J, et al. Analysis of the first stage deployment of Starlink constellation based on TLE[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2022, 42(5): 24-33.
- [22] 陈全, 杨磊, 郭剑鸣, 等. 低轨巨型星座网络: 组网技术与研究现状[J]. *通信学报*, 2022, 43(5): 177-189.
- CHEN Q, YANG L, GUO J M, et al. LEO mega-constellation network: networking technologies and state of the art[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(5): 177-189.
- [23] 戴成伟. 低轨卫星星座设计与评估[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2022.
- DAI C W. Design and evaluation of LEO satellite constellation[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [24] MEHLING T O, ZUCCARO C, BAETEN A. Modelling and validating product line variability for nanosatellites based on CUBESAT mission[C]//Applied Research Conference. University of Applied Sciences, Munich, Volume: 2017.
- [25] LANG T J, ADAMS W S. A comparison of satellite constellations for continuous global coverage[C]//Space Technology Proceedings (SPTP, volume 1): Mission Design & Implementation of Satellite Constellations. Dordrecht: Springer Netherlands, 1998: 51-62.
- [26] ULYBYSHEV Y. Near-polar satellite constellations for continuous global coverage[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1999, 36(1): 92-99.
- [27] LANG T. Low earth orbit satellite constellations for continuous coverage of the mid-latitudes[C]//Proceedings of the Astrodynamics Conference. Reston, Virginia: AIAA, 1996: 3638.
- [28] HUANG S, COLOMBO C, BERNELLI-ZAZZERA F. Multi-criteria design of continuous global coverage Walker and Street-



- of-Coverage constellations through property assessment[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 188: 151-170.
- [29] HERMAN J F C, MANCE S, FORQUERA P A, et al. Satellite constellations: US11479372[P]. 2022-10-25.
- [30] 郑鹏飞, 陈宏宇, 郭崇滨. 低轨巨型链形星座解析设计及效能分析[J]. *西北工业大学学报*, 2022, 40(1): 148-157.
- ZHENG P F, CHEN H Y, GUO C B. Analytical design and performance analysis of LEO mega chain satellite constellation[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2022, 40(1): 148-157.
- [31] 刘奇, 张强, 饶建兵, 等. 低轨星座构型保持研究现状与分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2023, 45(8): 2562-2569.
- LIU Q, ZHANG Z, RAO J B, et al. Research status and analysis of configuration maintenance of LEO constellation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45(8): 2562-2569.
- [32] 张大鹏, 沈红新. 基于精密星历的星链轨道特性研究[J]. *力学与实践*, 2022, 44(6): 1268-1278.
- ZHANG D P, SHEN H X. Study on the orbital characteristics of starlink satellites based on precise ephemeris[J]. *Mechanics in Engineering*, 2022, 44(6): 1268-1278.
- [33] 张众, 鄂智博, 黄丽霞, 等. 遥感卫星对区域目标可见窗口的半解析快速算法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(3): 573-580.
- ZHANG Z, E Z B, HUANG L X, et al. Semi-analytical algorithm for computing satellite-area target visibility[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2022, 62(3): 573-580.
- [34] SAVITRI T, KIM Y, JO S, et al. Satellite constellation orbit design optimization with combined genetic algorithm and semi-analytical approach[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2017, 2017(1): 1235692.
- [35] DEL PORTILLO I, CAMERON B G, CRAWLEY E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 159: 123-135.
- [36] PACHLER N, DEL PORTILLO I, CRAWLEY E F, et al. An updated comparison of four low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[C]//*Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-7.
- [37] WANG N Y, LIU L, QIN Z T, et al. Capacity analysis of LEO mega-constellation networks[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 18420-18433.
- [38] SEDIN J, FELTRIN L, LIN X Q. Throughput and capacity evaluation of 5G new radio non-terrestrial networks with LEO satellites[C]//*Proceedings of the GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [39] 刘立祥, 刘帅军. 大型低轨星座网络规划方法与仿真分析[J]. *天地一体化信息网络*, 2020, 1(2): 87-93.
- LIU L X, LIU S J. Network planning method and simulation analysis for large-scale low earth orbit satellite constellation networks[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2020, 1(2): 87-93.
- [40] KASSING S, BHATTACHERJEE D, ÁGUAS A B, et al. Exploring the “Internet from space” with hypatia[C]//*Proceedings of the ACM Press Internet Measurement Conference*. New York: ACM Press, 2020: 214-229.
- [41] HANDLEY M. Delay is not an option: low latency routing in space[C]//*Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks*. New York: ACM Press, 2018: 85-91.

[作者简介]



张鹏 (1987—), 男, 博士, 清华大学高级工程师, 主要研究方向为低轨星座系统设计。

王天舒 (1969—), 男, 博士, 清华大学教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星总体设计、多体航天器动力学与控制、充液航天器动力学。

马伟 (1984—), 男, 博士, 中国星网网络系统研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为卫星网络系统设计及基于模型的系统工程。

张世杰 (1979—), 男, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 银河航天(北京)通信技术有限公司首席科学家, 主要研究方向为卫星总体设计、低轨卫星互联网等。

赵祥天 (1992—), 男, 博士, 北京邮电大学副研究员、硕士生导师, 主要研究方向为低轨星座/无人机集群动力学与控制等。

赵亚飞 (1987—), 男, 博士, 北京邮电大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为低轨通信卫星星座技术与工程验证等。