

未来航天测控网资源调度管理模式探析

张 虹, 薛 嘉, 任 勃, 杜晓军, 薛 猛
(西安卫星测控中心, 陕西 西安 710043)

摘 要: 首先探讨现有航天测控网资源调度系统的运行模式及存在的问题; 然后对未来资源调度管理模式的发展趋势, 包括测控数据传输一体化、系统运行自动化、算法分配智能化、随遇接入与预分配共存等进行梳理; 最后按照“一体化、自动化、智能化”的管理需求, 构建未来调度模式的运行框架, 并对该框架下资源共用的算法进行分析, 对需要突破的关键技术进行深入探讨, 提出后续资源调度研究的目标及建议, 为后续的工程应用提供借鉴。

关键字: 巨型星座; 优先级; 合作博弈; 资源池

中图分类号: V556

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023039

Exploration and Analysis of Resource Scheduling and Management Mode in Future Space TT&C Network

ZHANG Hong, XUE Jia, REN Bo, DU Xiaojun, XUE Meng
Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China

Abstract: The running mode and existing issues of current resource scheduling system operation model of TT&C network were discussed firstly. Then the development trends of future resource scheduling and management models were summarized, included integration of data transmission, automation of system operation, intelligence of algorithm allocation, coexistence of random access and pre-allocation. In the end, accorded to the management demands of integration, automation and intelligentization, the operating framework of the future resource scheduling model was put forward. After that, the key technologies which need to be broken through of the framework were researched deeply. And the further construction object of resource scheduling research was proposed in order to provided a reference for subsequent engineering applications.

Keywords: giant constellation, priority, cooperative game, resource pool

0 引言

随着我国航天技术的不断发展, 在轨卫星的数量呈现爆发式增长态势, 近几年星座卫星日益增多, 数量之多前所未有, 尤其是未来巨型星座的发射, 将对现有的资源调度管理模式带来巨大挑战^[1-2]。传统的资源调度采用预分配模式, 是测控计划驱动下的卫星主动管理模式, 调度过程中有大量人工参与环节。预分配模式下的资源调度在使用效率、调度时效性、灵活性等方面都无法满足未来巨型星座模式下的卫星管控。巨型星座模式下, 卫星同时过境数

量多, 且卫星能力大幅提升, 卫星由简单的指令执行器变为可自主完成部分工作的智能体, 使“按需测控, 随遇接入”资源调度模式成为可能, 相较于传统预分配调度, 随遇接入对于测控资源调度的复杂度大大降低, 灵活性提高, 可满足未来多样化卫星的调度^[3-10]。本文通过研究未来调度模式发展趋势, 构想未来资源调度模式框架, 对适应未来调度模式的测控弧段智能分割算法、巨型星座模式下任务优先级的合理规划、资源动态重组技术研究、资源的精细化管理等关键技术进行深入分析, 使资源分配更合理、更高效, 满足未来多样化趋势下的资源调度管理需求。

1 调度管理模式现状及面临的问题

1.1 资源调度运行模式

传统的资源调度采用预分配模式，主要是人工参与的多次协调交互。在卫星数量少的情况下，该模式运行比较顺畅，流程如图1所示，具体处理步骤如下。

(1) 卫星用户根据卫星近一段时间的运行状态进行预判，对卫星测控资源提前规划，向资源调度中心申请资源。

(2) 设备用户根据设备运行状态及设备工作情况，提前规划，向资源调度中心提交设备停用申请。

(3) 资源调度中心根据各卫星和设备用户申请，统一筹划，按任务的静态优先级进行测控资源计划规划。规划结果不满足用户需求时，与各用户进行沟通协调。

(4) 资源调度中心最终发布卫星跟踪计划后，卫星用户依据测控计划提前安排卫星测控工作计划，设备按计划驱动模式完成卫星的测控工作。

该模式随着卫星数量规模及用户需求的激增呈现出

复杂度大幅增加，资源运行冲突数量大的特点，传统的解决资源冲突的方法是建立测站增加设备。但随着测控网的运行，巨型星座模式下大量卫星同时过境，依靠建立测站模式将需要增加大量设备，这是不现实的，无论是国内还是国外，都面临高昂的地面站建设、维护成本，全球布站难度都很大^[8]。

1.2 资源调度分配模式

在当前卫星任务跟踪过程中，计划驱动设备跟踪，卫星进入地面站可视范围内，地面站开始进行跟踪，卫星离开地面站可视范围后，地面站设备停止跟踪；卫星进入地面站可视范围内，全程跟踪；在资源规划过程中，测控数据传输分开规划，用户在申请过程中，用户之间不进行交流。

资源调度分配过程中，大量人工参与调度分配，操作员凭经验处理的情况较多，在之前设备数量少，且功能单一的情况下，操作员可快速完成，随着设备数量增加，功能复杂，依靠操作员的大量参与风险较多。

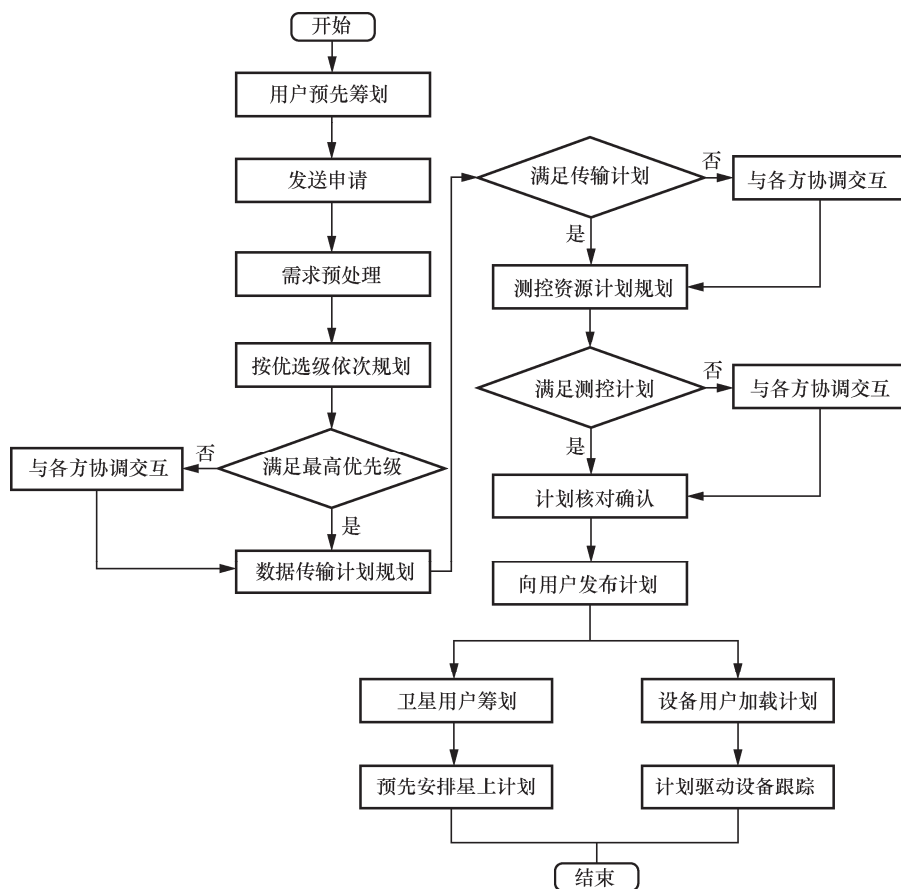


图1 预分配调度模式流程

1.3 预分配调度模式面临的问题

从以上分析可看出,预分配模式的资源调度适用于卫星数量少、设备套数不多且设备功能单一的情况;此模式下,大量人工参与的调度流程,操作员凭工作经验也可完成卫星的资源调度,但随着卫星数量的大幅增加,卫星用户需求的多样化,设备功能的增加,采用预分配模式的调度已不适用未来的测控资源调度,主要存在的问题如下。

(1)各卫星用户之间无沟通,用户存在盲目的资源“抢占”,有时临近任务开始时刻,释放资源,其他用户对释放的资源来不及规划,造成资源浪费,同时降低其他用户申请满足率。

(2)资源调度中心的粗放式管理,对用户的各类申请不进行系统规划。例如对卫星用户的各类申请不进行合并,直接任由用户随意申请,造成资源浪费。

(3)调度算法不智能,任务全弧段跟踪,这一定程度也降低了资源利用率。例如存在卫星不需要测站全程跟踪的情况,此种情况下,若算法智能切分,设备可直接转入下一个任务的准备或空闲状态,提高资源利用率。

(4)调度算法灵活性不够,以地面站计划驱动的主动式管理模式,需要用户提前进行工作筹划,设备由计划驱动,灵活性不够,耗费时间也较长。巨型星座模式下,卫星自主能力提高,“随遇接入”成为可能,该模式调度更灵活,可随时响应卫星的测控需求。

(5)随着设备功能的增强,一套设备同时具备多种功能,可同时完成多个任务,以前的测运控资源分开管理将造成资源浪费。

(6)同一个站点内同类型设备不能组合运用,一定程度上降低了资源使用效率。现在的设备主要是按型号研制,按套部署,设备硬件之间不共享,可考虑使用资源动态重组技术,将一个站点内所有设备纳入一个资源池,根据测控需要,对设备硬件之间进行组合使用,可极大提高设备利用效率。

2 未来调度模式发展趋势

随着卫星数量的大幅增加、巨型星座的发射,未来的资源调度模式将是如何对大规模多类型的测运控资源实施高效的调度管理,灵活快速响应众多卫星用户的测运控需求^[11-16]。调度模式必须适应“一体化、自动化、智能化”的发展,主要包括如下几点。

2.1 测控数据传输一体化

随着技术的发展,测控设备功能增强,数据传输测

控呈现出功能一体化的特性(同一设备可分时或同时完成卫星的数据传输和测控任务),称之为测控资源的一体化特性^[17-25]。测控数据传输一体化特性可极大提高设备资源的利用率,一定程度上节省了资源,缓解了资源紧张的问题。

2.2 系统运行自动化

预分配模式是人工参与的多次协调交互,系统自动化能力不高,人工参与协调降低了资源的响应时效。未来大数量卫星同时过境,调度的复杂性大幅增加,调度系统需具备高自动化能力,减少人工参与,快速响应用户需求。

2.3 算法分配智能化

(1)测控弧段智能切割,预分配模式可视弧段全程跟踪,系统不进行弧段执行任务情况判断,设备存在“无目的”完成跟踪,造成资源浪费。未来随着卫星数量的大幅增加,调度资源紧张情况将长期存在,调度系统智能化完成弧段切分,对于已完成任务的跟踪弧段,算法完成弧段切分,设备断开与卫星的联系,转入等待模式,可增加设备的空闲时段,提高资源利用率。

(2)弧段智能转换,当前在同一个地面站都部署有多套设备,两个任务各占用一套设备时,若有第3个任务到来,均因为资源冲突无法满足,在前两个任务可挪到同一套设备且均满足需求时,可腾出一套设备满足第3个任务。此种情况,因为卫星的增多,资源的紧张将长期存在,若通过算法智能化完成转换,可满足提高任务时效要求,具体做法如图2所示。

算法分配智能化还包括很多,需要长期进行研究,不断改进调度算法,更好地满足未来资源调度的各类要求。

2.4 卫星用户间的合作博弈

当前的资源申请,各卫星用户之间无交流,用户之间存在资源抢占情况,造成资源浪费,是典型的非合作博弈模式(博弈论是经济学最基本的理论之一,用于解决不同个体之间的竞争与相互制衡问题)。资源调度中引入合作博弈,就是鼓励卫星用户之间的合作,使各卫星用户在资源使用上更合理、更精细。在其他用户需要自己转让资源时,积极配合,提高自己在其他任务中心的报答系数,便于自己需要资源时,其他中心也能积极配合,提高任务满足率及资源总体利用率。

2.5 随遇接入与预分配模式共存

随遇接入是卫星进入任何一个地面设备的可视范围后,能够自动、快速、有效接入测控网络进行测控通信任务,最终完成“按需测控、随遇接入”。巨型星座模式下,

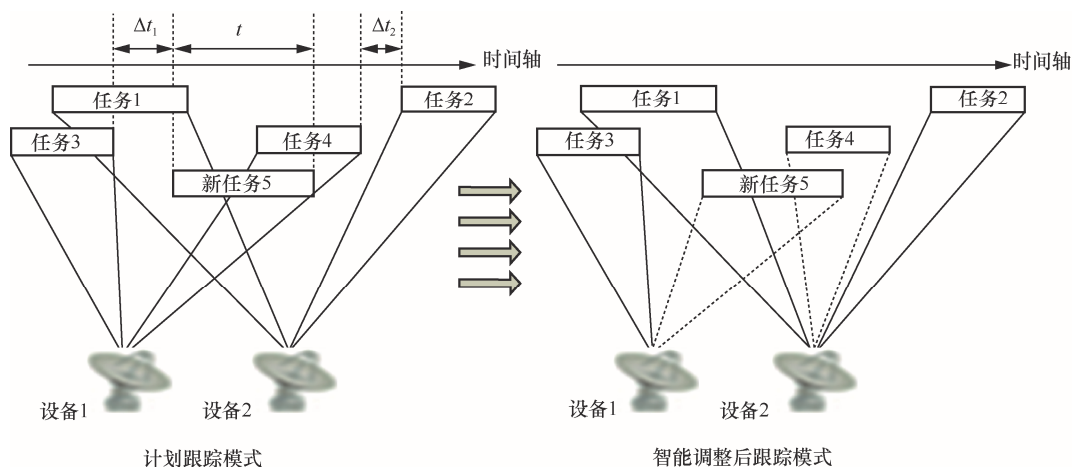


图 2 弧段智能转换示意

卫星的自主能力增强,可自主完成轨控、健康监测、数据下传需求等,卫星根据需要向地面设备发起测控请求,使随遇接入测控模式成为可能。

随遇接入的优势如下。

- (1) 调度灵活,借鉴蜂窝移动网络的随机接入机制,卫星可自动、快速完成与地面设备的连接。
- (2) 耗时短,效率高,卫星用户不需要提前筹划,卫星随时发起测控请求。
- (3) 资源利用率高,相比预分配模式下资源的预先安排,存在“无目的”跟踪情况,“按需测控、随遇接入”资源不存在浪费情况,利用率更高。

随遇接入是未来资源调度发展的主要模式,巨型星座模式下卫星数量大、卫星自主能力高,使用随遇接入模式更适合。现在轨运行的卫星管理模式,决定预分配模式依然长期存在,卫星按一定的规律长期运行,希望测控计划保证卫星的各项工作有序进行,因此未来测控资源调度模式下,随遇接入模式与预分配模式共存,如何更好地达到两种模式的平衡是未来需要重点研究的问题。

3 未来资源调度模式运行框架

随着卫星技术的不断发展,在轨运行的卫星数量大幅增加,卫星的测控需求也更加多样化,对资源调度管理模式带来巨大挑战。未来资源调度是传统的预分配与随遇接入两种模式共存,运行情况如图 3 所示

随遇接入模式下卫星的资源使用与预分配模式下的资源存在共享共用需求。具备随遇接入模式的卫星,卫星自主能力强,对地面设备依赖较少,具有大量用于随遇接入的设备,可能存在空闲资源,但这些空闲资源又不是绝对空闲。因为巨型星座模式下,卫星是“按需测控、随遇

接入”,随遇接入卫星可能随时发起测控需求,需要使用资源,所以这些空闲资源需分为绝对空闲和相对空闲部分。巨型星座系统运行过程中,为更好地进行资源的分配,最大限度地提高资源利用率,巨型星座用户需根据星座长期运行状态进行预判,判断未来一段时间内最大资源需求情况,便于资源调度中心更好地管理该部分空闲资源。

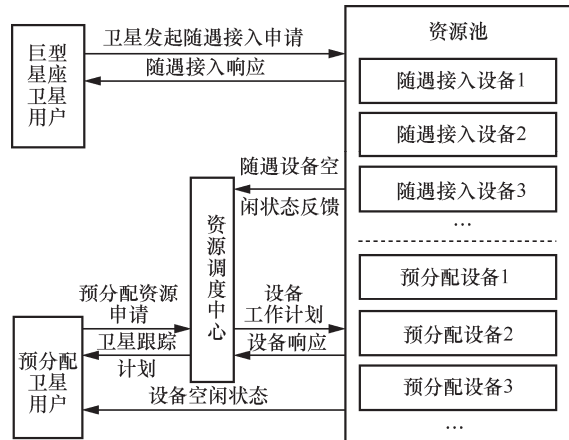


图 3 预分配与随遇接入模式共存框架

资源调度中心使用巨型星座模式下的空闲资源用于预分配模式时,预分配模式使用这部分资源时需具备随时退出的可能,用于巨型星座模式的大量应急情况。因此在预分配模式下,使用相对空闲资源时,应主要用于优先级低的卫星,且可随时退出,空闲资源按一定规则进行占用。

从图 3 可看出,随遇接入与预分配共存模式下,资源使用优势主要如下。

- (1) 测控资源的使用上更加灵活,通过对资源的物理隔离,既保证了随遇接入资源的随时可用,又提高了随

遇接入资源的利用率。

(2) 对资源的管理更加精细,在预分配情况下,对卫星进行优先级分类,低优先级的卫星优先使用随遇接入相对空闲资源,确保在应急情况下,可随时进行资源转让。

(3) 在随遇接入与预分配资源共享共用模式下,充分研究了资源的使用策略,例如智能化资源分配策略可极大提高资源使用效率,节省资源。

对于巨型星座“随遇接入”模式与预分配模式下的资源动态共享共用,在“余量”资源的使用上如何进行优化配置,达到资源最大化利用,还需要深入研究。

4 需要突破的关键技术

4.1 测控弧段智能分割算法

当前的调度采用可视即跟踪模式,测控计划驱动设备跟踪,卫星进入设备可视范围开始跟踪,卫星飞离设备可视范围停止跟踪。在很多情况下,卫星的任务不需要设备全程跟踪测控,为提高设备利用率,在卫星完成任务时,系统可智能切分弧段,设备自动转入空闲等待或转入下一个跟踪任务的准备,这样可增加设备空闲时段,极大提高单套设备日工作量,提高资源使用效率。测控弧段智能分割算法要求资源管理中心更精细地掌握卫星的实际需求,与卫星用户做好沟通,对申请的内容描述更精确,对卫星的需求进行分类标注。具体做法如图4所示。

图4(a)中,按卫星可视进行计划编排,图4(b)按卫星实际需求进行计划编排。从图4可看出,在相同时间里,图4(a)仅完成2圈次的卫星跟踪计划;图4(b)完成了5圈次的卫星跟踪计划,这极大提高了资源利用率,

提高了任务满足率,同时减少了资源碎片化时间(设备与卫星可视,但因时间较短不能完成任务)。

4.2 巨型星座模式下任务优先级的合理规划

优先级是资源调度涉及多用户同时申请资源的一个依据,巨型星座模式的一大特点就是同时过境卫星数量多,卫星每次过境时间短,卫星“按需测控、随遇接入”,在这种模式下,优先级将更为重要,决策时间更短。如何对巨型星座卫星的优先级进行合理规划,需要同巨型星座卫星用户进行不断沟通,同时两种模式共存下的优先级也需要进行按级分类,层层规划。优先级的分类不是固定一成不变的,需随着卫星任务的变化、卫星健康情况、任务重要程度等动态变化,因此在优先级设置上需考虑静态优先级和动态优先级两种情况。

(1) 静态优先级

静态优先级可认为是一般优先级,主要按卫星型号、卫星执行任务的重要性、卫星健康状况等进行分类,这种情况下,优先级预先设定,算法按设定的优先级为卫星分配资源。

(2) 动态优先级

动态优先级随着任务的性质、各类突发事件的种类等的变化实时变化,同时在动态资源分配模式下,需考虑对其他卫星的影响尽可能小。因此动态优先级比较复杂,需要深入研究,动态优先级是否合理在一定情况下决定应急任务申请的成功率。

4.3 资源动态重组技术研究

当前的站点都部署多套设备,不同设备硬件分系统之间不能共享共用^[26-27],设备的功能不能得到最大程度发挥,资源不能得到最大的利用,造成资源浪费。现阶段某

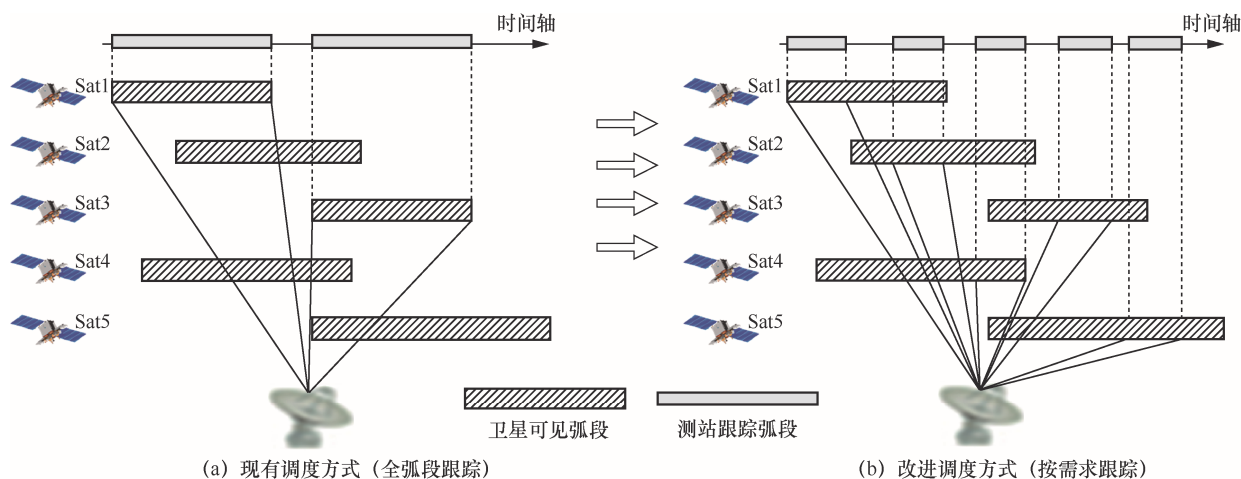


图4 测控弧段智能分割示意

设备分系统出现故障的情况下,一般的处理方式是设备所有分系统停用,待故障分系统故障排除后,整套设备进行入网验证,确定参数符合要求后可重新参加卫星的资源调度工作,这种情况造成测运控资源极大浪费。因此研究资源动态重组非常重要,资源动态重组包括硬件及软件两种情况。

通过资源动态重组可灵活配置,使部署多套设备的测站可极大发挥设备潜能,更好地完成各类测运控任务。

随着未来资源调度技术的发展,对同站点多套设备的测控资源优化组合和灵活配置是最大化利用测控资源,提高资源利用率的有效途径,同时能一定程度缓解资源紧张的情况。

4.4 资源的精细化管理

为更好地管理航天测控资源,做到资源合理利用,最大限度提高资源利用率,还需从管理精细化上进行研究,主要包括以下 3 个方面。

(1) 测控数据传输一体化管理

改变现有的测控数据传输分开管理模式,最大限度地节省资源。一套设备能同时完成测控和数据传输两个任务时,算法不分配两套设备,数据传输和测控可以自动影随。

(2) 卫星用户需求的合并处理

现阶段资源的管理比较粗放,用户提出的资源使用需求往往不进行合并,造成资源浪费。随着卫星数量迅速增加,各种需求也随之增加,如何对各类卫星用户的需求进行合并处理,可通过算法完成合理的规划,有效提高资源利用率,也需深入研究。

(3) 优化算法

现阶段卫星发射数量大幅增加,卫星各类需求也不断变化,相关算法应对卫星的各类需求进行合理的描述以增加资源申请成功率,同时合理的算法也可减少碎片化时间,减少资源浪费,提高资源使用效率。因此不断优化资源调度算法也是资源精细化管理不可或缺的一部分。

资源紧张问题将长期存在,需要资源管理者对资源的管理做到精细化、最优化等,以最大程度提高资源利用率。精细化管理也会随着卫星技术发展、算法优化等不断改进。

参考文献

[1] 孙刚,彭双,陈浩,等.面向测控数传资源一体化场景的卫星地面站资源多目标优化方法[J].航空学报,2022,43(9):653-669.
SUN G, PENG S, CHEN H, et al. Multi-objective optimization method oriented to integrated scenario of TT & C resources and

data transmission resources[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(9): 653-669.

[2] 章恩韬,司一童,张威,等.低轨巨型星座发展及其测控方法探析[J].无线电通信技术,2022,48(5):857-864.
ZHANG E T, SI Y T, ZHANG W, et al. Development and measurement and control methods of low-orbit giant constellations[J]. Radio Communications Technology, 2022, 48(5): 857-864.

[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. Progress and prospects of research on configuration design and control of low earth orbit giant constellations[J]. China Space Science and Technology, 2022, 42(1): 1-15.

[4] 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.

[5] 陈全.面向低轨巨型星座的星地一体化网络关键技术研究[D].长沙:国防科技大学,2021.
CHEN Q. Towards LEO mega-constellation: study on integrated satellite-terrestrial networks[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021.

[6] 薛乃阳,丁丹,贾玉童,等.基于DQN的异构测控资源联合调度方法[J].系统仿真学报,2023,35(2):423-434.
XUE N Y, DING D, JIA Y T, et al. DQN-based joint scheduling method of heterogeneous TT & C resources[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(2): 423-434.

[7] 安元元,李伟超,王伟,等.一种低轨卫星星座测控地面站调度策略研究[J].时间频率学报,2021,44(2):120-131.
AN Y Y, LI W C, WANG W, et al. Research on schedule strategy of ground stations for LEO satellites[J]. Journal of Time and Frequency, 2021, 44(2): 120-131.

[8] 张威,吴涛,马宏,等.智能一体化航天测运控网络发展探析[J].天地一体化信息网络,2021(2):82-89.
ZHANG W, WU T, MA H, et al. Discussion on the development of integrated and intelligent space TT & C network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021(2): 82-89.

[9] 雷瀚,杨帆,刘建平,等.航天地基测运控资源调度多任务需求分析及统一的任务模型研究[C]//第三届体系工程学术会议论文集——复杂系统与体系工程管理.2021:100-110.
LEI H, YANG F, LIU J P, et al. Multi-task demand analysis and unified

- task model research of space-based survey, transportation and control resource scheduling[C]//Proceedings of the 3rd Symposium on Systems Engineering-Complex Systems and Systems Engineering Management. 2021: 100-110.
- [10] 汪春霆, 翟立君, 徐晓帆. 天地一体化信息网络发展与展望[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 491-504.
- WANG C T, ZHAI L J, XU X F. Development and prospects of space-terrestrial integrated information network[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 491-504.
- [11] 周笛, 盛敏, 郝琪, 等. 巨型星座系统的网络运维与资源管控技术[J]. 天地一体化信息网络, 2020(1): 26-35.
- ZHOU D, SHENG M, HAO Q, et al. Network operation, maintenance and resource management in mega constellation system[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020(1): 26-35.
- [12] 章罗娜, 马忠成, 饶建兵, 等. 低轨卫星互联网发展趋势及市场前景[J]. 国际太空, 2020(11): 28-31.
- ZHANG L N, MA Z C, RAO J B, et al. Development trend and market prospect of LEO satellite internet[J]. International Space, 2020(11): 28-31.
- [13] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 1-16.
- WU W. Survey on the development of space-integrated-ground information network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 1-16.
- [14] 刘建平, 张天昱, 李伟. 面向全球覆盖随遇接入的测控服务构想[C]//第十一届中国卫星导航年会论文集. 2019.
- LIU J P, ZHANG T Y, LI W. Conception of survey and transportation control service for global coverage anytime access[C]// Proceedings of the 11th China Satellite Navigation Annual Conference. 2019.
- [15] 文龙, 雷磊, 叱忱. 航天地面站网资源军民融合与建设发展思考[C]//第29届飞行器测控学术会议. 2018: 392-398.
- WEN L, LEI L, CHA Z. Thoughts on integration of defense and civilian technologies of Space Ground Station Network Resources and Its Construction and Development[C]//29th Symposium on Aircraft Measurement and Control. 2018: 392-398.
- [16] 刘培杰, 闫迪, 王彭. 随机接入用于天地一体化航天测控网建设构想[C]//2018软件定义卫星高峰论坛会议摘要集. 2018.
- LIU P J, YAN D, WANG P. Random access for space TT&C network construction[C]//2018 Summary of Software Defined Satellite Summit Forum. 2018.
- [17] 李长德, 徐伟, 徐梁, 等. 基于深度神经网络的多星测控调度方法[J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(1): 65-72.
- LI C D, XU W, XU L, et al. Multi-satellite TT & C scheduling method based on DNN[J]. Chinese Space Science and Technology, 2022, 42(1): 65-72.
- [18] 伍国华, 王天宇. 基于自适应模拟退火算法的大规模星座测控资源调度方法[J]. 航空学报, 2022.
- WU G H, WANG T Y. Large-scale constellation TT&C resource scheduling method based on adaptive simulated annealing algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. 2022.
- [19] 杨灿, 陈始茂, 邱宏燕. 天空地一体化网络多中继链路自适应调度技术[J]. 移动通信, 2021, 45(5): 57-61.
- YANG C, CHEN S M, QIU H Y. Adaptive scheduling technology of multi-relay links in space-air-ground integration networks[J]. Mobile Communications, 2021, 45(5): 57-61.
- [20] 唐成圆. 面向测控的卫星网络常规任务规划算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学. 2020.
- TANG C Y. Research on routine task planning algorithm of satellite network oriented to measurement and operation control[D]. Xi'an: Xidian University. 2020.
- [21] 张维义. 航天测控系统测试资源优化配置策略[J]. 信息技术与信息化, 2019(8): 240-242.
- ZHANG W Y. Optimal allocation strategy of test resources in space TT&C system[J]. Information Technology and Informatization, 2019(8): 240-242.
- [22] 陶孙杰, 宋竹. 一种测控数传一体化站网资源调度算法[J]. 电讯技术, 2018, 58(7): 760-767.
- TAO S J, SONG Z. A ground-station resource scheduling algorithm based on integration of TT&C and data transmission[J]. Telecommunication Engineering, 2018, 58(7): 760-767.
- [23] 贺川, 邱涤珊, 朱晓敏, 等. 基于滚动优化策略的成像侦察卫星应急调度方法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(10): 2685-2694.
- HE C, QIU D S, ZHU X M, et al. Emergency scheduling method for imaging reconnaissance satellites based on rolling horizon optimization strategy[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013, 33(10): 2685-2694.
- [24] 李玉庆, 王日新, 徐敏强, 等. 基于改进遗传算法的一类多资源测控调度问题研究[J]. 宇航学报, 2012, 33(1): 85-90.
- LI Y Q, WANG R X, XU M Q, et al. An improved genetic algorithm for a class of multi-resource range scheduling problem[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(1): 85-90.
- [25] 金光, 武小悦, 高卫斌. 基于冲突的卫星地面站系统资源调度与能力分析[J]. 小型微型计算机系统, 2007, 28(2): 310-312.

JIN G, WU X Y, GAO W B. Conflict based resource scheduling and capability analysis of satellite-ground station system[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2007, 28(2): 310-312.

- [26] 刘燕都, 焦义文, 陈雨迪, 等. 虚拟化测控站体系结构与关键技术[J]. 电讯技术, 2020, 60(4): 378-385.

LIU Y D, JIAO Y W, CHEN Y D, et al. Satellite ground station virtualization: architecture and key technology[J]. Telecommunication Engineering, 2020, 60(4): 378-385.

- [27] 刘云杰, 王彬, 刘友永. 基于资源池的航天测控资源动态重组实现技术[J]. 无线电工程, 2018, 48(8): 699-703.

LIU Y J, WANG B, LIU Y Y. Research on implementing technologies of dynamic resources restructuring for aerospace TT&C based on resource pooling[J]. Radio Engineering, 2018, 48(8): 699-703.

- [28] 凌晓冬, 武小悦, 李云飞, 等. 卫星测控调度问题发展趋势探析[J]. 无线电工程, 2022, 52(10): 1788-1793.

LING X D, WU X Y, LI Y F, et al. Analysis on the developing trend of satellite TT & C scheduling[J]. Radio Engineering, 2022, 52(10): 1788-1793.

[作者简介]



张虹 (1980—), 女, 硕士, 西安卫星测控中心高级工程师, 主要研究方向为航天测控网资源调度与规划。

薛嘉 (1981—), 男, 博士, 西安卫星测控中心高级工程师, 主要研究方向为航天器轨道确定与控制。

任勃 (1984—), 男, 硕士, 西安卫星测控中心工程师, 主要研究方向为航天测控网资源调度总体。

杜晓军 (1987—), 男, 硕士, 西安卫星测控中心工程师, 主要研究方向为航天测控网资源调度与规划。

薛猛 (1989—), 男, 本科, 主要研究方向为航天测控网远程监控与通信。