

DOI: 10.3724/zrht.1674-5825.2026011

负载均衡下的月球星座通导耦合任务规划

许静文¹, 陈星伊², 张 炎², 郭耀华^{1*}, 黄 河¹, 李相国¹

(1. 西北工业大学航天学院, 西安 710072; 2. 宇航动力学国家重点实验室, 西安 710043)

摘 要: 针对月球星座卫星在共享硬件上同时提供通信与导航服务所产生的设备级资源耦合问题, 提出了一种基于负载均衡的耦合任务调度混合整数线性规划 (MILP) 框架。通过加权聚合方法将异构资源消耗转化为统一的标量负载度量, 通过时间分段技术将瞬时互斥约束转化为累积容量约束, 建立了包含负载方差等 4 个目标的多目标优化模型。以负载方差最小化为核心机制, 通过空间和时间维度的任务重分配隐式保留导航所需的多星汇聚窗口, 并采用 L1 范数辅助变量分解技术将二次方差目标精确线性化为标准 MILP 形式。在 8 星 ELFO 星座上开展了多个任务规模的仿真实验, 仿真结果表明, 耦合规划的总任务完成率平均提升 12.3%, 负载均衡变异系数在所有规模下均优于分离规划。

关键词: 月球星座; 通信导航耦合; 任务调度; 混合整数线性规划; 负载均衡; 多目标优化

中图分类号: V412.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5825(2026)02-0190-11

Coupled Communication-navigation Task Scheduling for Lunar Constellations under Load Balance

XU Jingwen¹, CHEN Xingyi², ZHANG Yan², GUO Yaohua^{1*},
HUANG He¹, LI Xiangguo¹

(1. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. State Key Laboratory of Aeronautics Dynamics, Xi'an 710043, China)

Abstract: To address the device-level resource coupling arising from simultaneously running communication and navigation services on shared hardware in lunar satellite constellations, a coupled task scheduling framework based on mixed integer linear programming (MILP) with load-balance-driven optimization was proposed. In this study, heterogeneous resource consumption was transformed into a unified scalar load metric through weighted aggregation, and instantaneous mutual exclusion constraints were converted into cumulative capacity constraints via a two-hour temporal segmentation. A multi-objective optimization model incorporating service quality, task completion rate, navigation efficiency, and load variance was formulated. Load variance minimization served as the core mechanism, implicitly preserving the multi-satellite windows required for navigation through spatial and temporal task redistribution. The quadratic variance objective was exactly linearized into a standard MILP form using L1-norm auxiliary variable decomposition. Simulation experiments were conducted on an eight-satellite elliptical frozen orbit constellation across task scales. The results demonstrated that coupled planning improved the overall task

收稿日期: 2026-02-10; 修回日期: 2026-03-28

第一作者: 许静文, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向为在轨任务规划、航天测控工程。E-mail: xjw0324@nwpu.edu.cn

* 通讯作者: 郭耀华, 男, 博士, 副教授, 研究方向为星座任务规划、航天器在轨控制。E-mail: y.guo2@nwpu.edu.cn

引用格式: 许静文, 陈星伊, 张炎, 等. 负载均衡下的月球星座通导耦合任务规划[J]. 载人航天, 2026, 32 (2): 190-200. Xu J W, Chen X Y, Zhang Y, et al. Coupled communication-navigation task scheduling for lunar constellations under load balance[J]. Manned Spaceflight, 2026, 32 (2): 190-200.

completion rate by an average of 12.3%. The load balance coefficient of variation was consistently superior under coupled planning across all scales.

Key words: lunar constellation; communication-navigation coupling; task scheduling; Mixed-Integer Linear Programming (MILP); load balance; multi-objective optimization

1 引言

月球通信导航星座网络已成为支撑持续月球探测的关键基础设施。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的阿尔忒弥斯计划^[1]、中国国际月球科研站(International Lunar Research Station, ILRS)^[2]、欧洲空间局(European Space Agency, ESA)月球村^[3]等国际任务均需要持续覆盖,以支持载人任务、机器人探测器、自主车辆及资源开采等多类型用户^[4],将月球打造为长期人类驻留的可持续平台。然而,单星数亿美元的部署成本和数月的轨道转移周期,使得分别部署通信星座和导航星座在经济上难以承受^[5]。因此,月球卫星须利用共享硬件同时提供2种服务,由此形成资源耦合^[6]。通信下行和导航广播的工作负载因功率竞争和天线互斥而存在上限约束。

任务调度的核心是在时间、空间和频率域合理分配卫星资源,将通信任务(视频下载、遥测数传)和导航任务(定位服务)映射到有限的卫星容量上,同时满足可见窗口与服务质量的双重要求。卫星任务调度本质上是NP-hard的组合优化问题,现有研究已形成多种建模与求解范式^[7,8]。在精确优化方法方面,Chen等^[9]针对多星成像调度建立了混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP)模型,通过分支定界算法在中等规模问题上获得全局最优解,但面临变量数随任务数指数增长的可扩展性挑战。Hebrard等^[10]将约束规划应用于通信卫星测试任务调度,利用约束传播技术大幅缩减搜索空间,实现了对复杂时序约束的灵活处理。杜永浩等^[11]提出了卫星任务调度统一化约束满足模型与多策略协同求解方法,在遥感与测控2类不同航天器任务中均表现出良好的适用性。在元启发式方法方面,Wu等^[12]针对敏捷卫星调度中姿态转换时间依赖于相邻任务序列的特点,提出了数据驱动的改进遗传算法,通过历史调度数据指导种群初始化和交叉算子设计,显著提升了求解效率。Zhang等^[13]利用基于粒子群优化的队列调度机制解决大规模低轨卫星通信网络的资源分配与负载均衡问题。

在机器学习方法方面,Herrmann等^[14]系统对比了Q-learning、深度Q网络和近端策略优化等强化学习算法在地球观测卫星调度中的表现,分析了不同算法在收敛速度和方案质量之间的权衡关系。李可等^[15]提出了基于深度强化学习的时效性优化卫星动态任务实时调度方法,任务观测时效性较传统方法提高了21.14%。然而,上述工作均针对地球星座中的单一服务场景,通信与导航服务各自独立运行于专用硬件和频段上,不存在设备级的资源耦合与互斥约束,因此无法适用于要求通导一体化的月球星座。

在资源分配的公平性与均衡性优化方面,Sheng等^[16]研究了6G星地融合网络中的覆盖增强问题,提出了面向多层异构网络的星座配置与资源分配联合优化方法,其中,负载均衡作为关键指标用于衡量星座资源的空间分布均匀性。在低轨通信星座中,负载均衡技术已被广泛应用于解决热点区域的容量瓶颈和星间流量不均问题^[17]。然而,上述负载均衡方法主要面向同构服务场景下的单维度资源分配,处理的是同类任务之间的负载不均。月球星座面临的是通信与导航2种异构服务在天线、功率、计算3个维度上的耦合竞争,但现有方法未能涉及这种多维度异构资源的耦合调度问题。

月球星座面临多重经济与物理约束,使得上述通用方法更加难以直接适用。一方面,星座规模受预算限制,远小于地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)和中轨导航星座的规模,导致月球星座对月球表面呈现间歇性覆盖特征,单星单圈次对月球极区可见窗口仅10~15 min^[18];另一方面,月球卫星因高倾角椭圆冻结轨道(Elliptical Frozen Orbit, ELFO)导致太阳照射效率低下,功率预算远低于地球轨道卫星^[19]。此外,硬件级耦合在3个子系统层面引发需求冲突:①天线互斥——通信依赖高增益窄波束天线进行点对点链路,而主动导航采用宽波束全向广播进行同时测距服务^[20],模式切换产生数秒的重配置开销,引发服务容量碎片化;②功率竞争——通信下行链路的发射放大器和星上处理消耗大量功率,导航测距的信号生成同样

需要可观功率,多任务同时运行可能超出功率预算上限;③计算资源竞争——协议处理、加密和相关引擎共享,在采用通信频段进行主动测距的架构中,信道带宽也成为竞争对象。这些构成了月球星座区别于地球星座的核心技术挑战。

面对上述问题,当前运行实践仍沿用自地球系统的分离规划方法^[21]。先调度通信任务以优化吞吐量,再在剩余容量上以时隙插入方式调度导航任务,第二阶段不修改第一阶段的调度决策。这种顺序分离策略产生 3 类严重的效率损失。①资源冲突:由于 2 个阶段独立决策,当通信和导航任务被分别分配至同一卫星的同一时段时,将违反天线互斥约束,需要紧急重调度。②负载失衡:通信阶段仅优化通信目标而不考虑后续导航需求,导致部分卫星利用率超过 90%,而其他卫星低于 40%,星座整体资源未被充分利用。③几何违背:通信任务在第一阶段优先占据最优的多星汇聚时段,使导航阶段仅剩碎片化的单星窗口,这也是最关键的问题。导航定位要求至少 3 颗卫星同时可见且位置精度衰减因子(Position Dilution of Precision, PDOP)不超过阈值,而月球极区的多星汇聚窗口本身就十分稀缺,一旦被通信任务占用便无法恢复。

针对上述问题,本文提出一种集成框架,通过同步全局规划解决通信导航耦合任务调度问题。区别于顺序独立优化,本文建立统一的多目标 MILP 模型联合全局优化 2 类服务的任务分配,并通过负载抽象显式处理耦合关系。首先,建立加权聚合方法,将功率、天线和带宽等异构资源消耗转化为统一的标量负载度量,并通过时间分段将瞬时互斥转化为累积容量约束;然后,设计负载均衡驱动的全局优化框架,以负载方差最小化为核心机制,隐式保留导航所需的多星汇聚窗口,通过 L1 范数精确线性化实现标准 MILP 求解;最后,通过 4 个任务规模的仿真实验,从任务完成率和负载均衡 2 个维度验证所提方法的有效性与可扩展性。

2 月球星座通导耦合任务规划问题建模

2.1 月球通导星座系统架构

月球通信导航星座的系统架构如图 1 所示。考虑由 J 颗卫星组成的月球星座,采用 ELFO 实

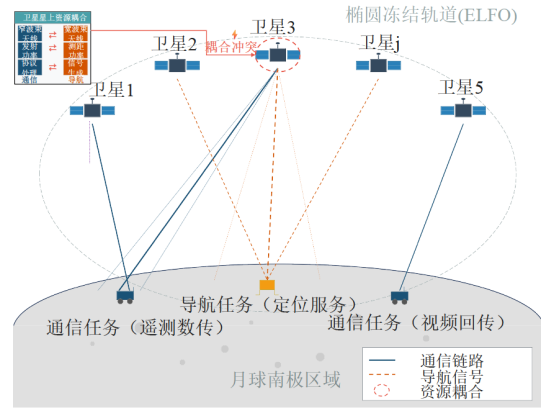


图 1 月球通信导航星座系统架构

Fig. 1 System architecture of lunar communication-navigation constellation

现对月球南极区域的强覆盖^[18]。ELFO 的特点是近月点位于南极上方,使卫星在南极区域停留时间较长,从而在有限的卫星数量下实现对极区的高覆盖率。卫星 j 在时刻 t 的状态见式 (1)。

$$\mathbf{s}_j(t) = [\mathbf{r}_j(t), \mathbf{v}_j(t), C_j^{\max}] \quad (1)$$

式中, $\mathbf{r}_j(t)$ 为卫星 j 在月心惯性系 (Moon-Centered Inertial, MCI) 下的三维位置向量,由初始星历通过轨道传播计算获得; $\mathbf{v}_j(t)$ 为卫星 j 在 MCI 系下的三维速度向量; $C_j^{\max}$ 为卫星 j 每个时段的最大负载容量,反映卫星在功率、天线时间和计算资源方面的综合承载上限。

星座服务的任务集 $\mathbf{I} = \mathbf{C} \cup \mathbf{N}$ 包含通信任务集合 $\mathbf{C}$ 和导航任务集合 $\mathbf{N}$ 。任务 i 的特征参数见式 (2)。

$$\mathbf{Task}_i = \{\tau_i, pos_i, W_i, D_i, Q_i^{\text{req}}\} \quad (2)$$

式中, $\tau_i \in \{\text{comm}, \text{nav}\}$ 为服务类型, comm 表示通信任务, nav 表示导航任务; pos_i 为用户在月面或近月空间的位置坐标; $W_i = [t_i^{\text{start}}, t_i^{\text{end}}]$ 为服务窗口, t_i^{start} 为允许开始服务的最早时刻, t_i^{end} 为必须结束服务的最晚时刻; D_i 为该任务所需的最小服务持续时间,以时隙数计,通信任务典型值约 5 min,导航任务典型值约 10 min; Q_i^{req} 为质量要求参数,对通信任务表示最小载噪比 (Carrier-to-Noise Ratio, CNR) 阈值 $\text{CNR}_{\min}$,对导航任务表示最大 PDOP 阈值 $\text{PDOP}_{\max}$ ^[22,23]。

为实现负载分布的精细控制,将规划时间窗划分为固定时长的时段,见式 (3)。

$$T_s = \{t \in T : t_s^{\text{start}} \leq t < t_s^{\text{end}}\}, \quad \forall s \in S \quad (3)$$

式中, T 为全部时隙的集合, 以 1 min 为分辨率离散化; S 为时间段索引集合; T_s 为时段 s 所包含的时隙子集。各时间长度为 2 h, 包含 120 个分钟时隙。时段划分的目的是在保持足够时间分辨率的同时, 将负载均衡约束聚合到可处理的粒度, 在建模精度与计算复杂度之间取得平衡。

2.2 通信导航耦合资源的负载建模

卫星的资源耦合导致分离顺序规划产生 3 类失效模式: ① 2 种服务在独立调度后被分配至同一卫星的同一时段时, 违反天线互斥约束; ② 负载分布不均导致局部过载; ③ 通信任务在第一阶段占用多星汇聚窗口, 导致第二阶段导航任务仅剩碎片化的单星窗口。

针对上述多维耦合问题, 通过加权聚合将异构资源消耗抽象为标准化的标量负载单元, 将 3 个物理维度的竞争关系简化为 1 个可处理的负载分配问题。卫星 j 在时隙 t 的瞬时负载见式 (4)。

$$l_j^t = \sum_{i \in I} w(\tau_i) \cdot x_{ij}^t \quad (4)$$

式中, $x_{ij}^t \in \{0, 1\}$ 为二值分配变量, $x_{ij}^t = 1$ 表示任务 i 在时隙 t 由卫星 j 服务, $x_{ij}^t = 0$ 表示不服务; I 为全部任务集合; $w(\tau_i)$ 为权重函数, 表征不同任务类型对卫星资源的差异化消耗, 见式 (5)。

$$w(\tau_i) = \begin{cases} w_c = 1.2, & \tau_i = \text{comm} \\ w_n = 1.0, & \tau_i = \text{nav} \end{cases} \quad (5)$$

式中, w_c 和 w_n 分别为通信和导航任务的负载权重。由于通信服务在天线指向控制精度、发射放大器功率消耗和星上信号处理复杂度三方面均高于导航广播, 因此通信任务的权重高于导航任务, 经验校准表明, 通信任务消耗的综合资源约比导航任务多出 20%。该加权方案的核心价值在于将原本需要在功率域、天线域和计算域分别建模的 3 个耦合约束简化为单一标量负载的容量约束, 在大幅降低模型复杂度的同时保持了对耦合关系的本质刻画。

在瞬时负载的基础上, 通过时段聚合将负载建模从时隙级提升到时段级。卫星 j 在时段 s 的累积负载见式 (6)。

$$L_j^s = \sum_{t \in T_s} l_j^t = \sum_{t \in T_s} \sum_{i \in I} w(\tau_i) \cdot x_{ij}^t \quad (6)$$

式中, L_j^s 为卫星 j 在时段 s 内所有时隙的瞬时负载之和; T_s 为时段 s 所包含的时隙子集。该聚合方案将原本需要在每个 1 min 时隙上强制执行的瞬时互斥约束转化为在每个 2 h 时段上的累积容量约束 $L_j^s \leq C_j^{\text{max}}$, 约束数量从 $|J| \times |T|$ 降低到 $|J| \times |S|$, 显著提升了模型的可处理性。2 h 的时段持续时间允许在满足容量约束的前提下, 在同一时段内交错执行通信与导航任务, 同时避免了更长聚合窗口导致的负载集中。

2.3 耦合调度优化目标

基于上述负载模型, 将耦合调度问题建模为加权求和形式的多目标优化^[24], 见式 (7)。

$$\max F = W_1 \cdot F_1 + W_2 \cdot F_2 + W_3 \cdot F_3 - W_4 \cdot F_4 \quad (7)$$

式中, F_1 为服务质量目标, 衡量分配资源超出最低门限满足任务需求的程度; F_2 为任务完成率目标, 最大化成功服务任务的比例; F_3 为导航效率目标, 在保持几何精度的前提下鼓励减少卫星使用; F_4 为负载均衡目标, 最小化星座内各卫星的负载方差; 权重向量 $W = [W_1, W_2, W_3, W_4]$ 为各目标分配优先级。每个目标的数学表达式将在 3.1 节中详细阐述。

3 基于 MILP 的耦合任务调度

3.1 多目标优化框架

基于式 (7) 中的多目标函数, 本节详述各目标的数学表达式。权重向量将任务完成率 F_2 和负载均衡 F_4 作为主要优化目标赋予更高权重, 而服务质量 F_1 和导航效率 F_3 作为辅助优化目标赋予较低权重。该配置反映了月球星座运行的核心诉求: 优先保证尽可能多的任务被完成, 同时防止资源失衡导致的系统性服务降级。

1) 服务质量 F_1 。服务质量目标评价分配资源在满足最低门限的基础上进一步提升任务服务品质的程度。通信任务的服务品质取决于链路 CNR: CNR 越高, 数据传输的误码率越低。导航任务的服务品质取决于 PDOP: PDOP 越小, 用户定位精度越高。目标以相等权重 $\alpha = \beta = 0.5$ 综合通信和导航 2 个分量, 见式 (8)。

$$F_1 = \alpha \cdot S_{\text{comm}} + \beta \cdot S_{\text{nav}} \quad (8)$$

通信质量评分汇总各分配方案的归一化 CNR

得分, 见式 (9)。

$$S_{\text{comm}} = \frac{1}{|\mathbf{C}| \cdot |\mathbf{T}|} \sum_{i \in \mathbf{C}} \sum_{j \in \mathbf{J}} \sum_{t \in \mathbf{T}} x_{ij}^t \cdot \min \left(\frac{\text{CNR}_{ij}^t}{\text{CNR}_{\min}}, 2.0 \right) \quad (9)$$

式中, $|\mathbf{C}|$ 为通信任务总数; $|\mathbf{T}|$ 为总时隙数; $\mathbf{J}$ 为卫星集合; CNR_{ij}^t 为时隙 t 由卫星 j 服务通信任务 i 时的载噪比预测值。归一化上限设为 2.0, 防止个别异常高 CNR 链路主导目标函数, 确保各通信任务间质量改善的均衡性。导航质量评估卫星组合的几何配置优劣, 见式 (10)。

$$S_{\text{nav}} = \frac{1}{|\mathbf{N}| \cdot |\mathbf{T}|} \sum_{i \in \mathbf{N}} \sum_{\mathbf{S}} \sum_{t \in \mathbf{T}} y_i^{\text{nav}}(\mathbf{S}, t) \cdot \min \left(\frac{\text{PDOP}_{i(\mathbf{S})}}{\text{PDOP}_{\text{ideal}}}, 3.0 \right) \quad (10)$$

式中, $|\mathbf{N}|$ 为导航任务总数; $y_i^{\text{nav}}(\mathbf{S}, t) \in \{0, 1\}$ 为导航组合变量, 表示导航任务 i 在时隙 t 是否使用卫星组合 $\mathbf{S}$ 提供服务, $\mathbf{S}$ 为包含不少于 3 颗卫星的卫星子集 ($\mathbf{S} \subseteq \mathbf{J}$); $\text{PDOP}_{i(\mathbf{S})}$ 为导航任务 i 使用卫星组合 $\mathbf{S}$ 时的 PDOP 值; $\text{PDOP}_{\text{ideal}} = 1.0$ 表示理论最优值。上限 3.0 反映了 PDOP 改善超越特定几何配置后的收益递减效应。

2) 任务完成率 F_2 。该目标最大化成功完成服务的任务比例, 见式 (11)。

$$F_2 = \frac{1}{|\mathbf{I}|} \sum_{i \in \mathbf{I}} z_i \quad (11)$$

式中, $|\mathbf{I}|$ 为全部任务总数; $z_i \in \{0, 1\}$ 为任务完成指示变量, $z_i = 1$ 表示任务 i 在指定窗口 W_i 内获得了不少于 D_i 的服务时隙数。任务完成判定由 3.2 节的式 (19) 约束控制。

3) 导航效率 F_3 。该目标鼓励在满足定位精度要求的前提下使用尽可能少的卫星。主动导航仅需 3 颗卫星即可满足三边测量要求^[25], 但额外卫星可改善 PDOP, 代价是消耗更多容量。导航效率项通过奖励系数激励高效配置, 见式 (12)。

$$F_3 = \frac{1}{|\mathbf{N}|} \sum_{k \in \mathbf{N}} \sum_{\mathbf{S}} c_S \cdot y_k^{\text{nav}}(\mathbf{S}) \quad (12)$$

式中, $y_k^{\text{nav}}(\mathbf{S})$ 表示导航任务 k 在其整个服务窗口内是否采用了卫星组合 $\mathbf{S}$; c_S 为奖励系数, 见式 (13)。

$$c_S = \frac{3}{|\mathbf{S}|} \quad (13)$$

式中, $|\mathbf{S}|$ 为卫星组合中的卫星数量。三星组合奖励系数为 1.0, 四星组合为 0.75, 更大组合按比例递减。该表述本质上是线性的, 因为 c_S 是对各可行组合在问题构建时预计算的常数。

4) 负载均衡 F_4 。负载均衡是处理通导耦合关系的关键优化目标, 通过将多维资源冲突转化为可处理的分布优化问题^[16]。该目标最小化累积负载方差, 见式 (14)。

$$F_4 = \frac{1}{|\mathbf{S}|} \sum_{s \in \mathbf{S}} \frac{1}{|\mathbf{J}|} \sum_{j \in \mathbf{J}} (L_j^s - \bar{L}^s)^2 \quad (14)$$

式中, $\bar{L}^s$ 为时段 s 内各卫星的平均累积负载; $|\mathbf{S}|$ 为时间段总数; $|\mathbf{J}|$ 为卫星总数。

最小化负载方差通过空间重分配和时间重分配 2 种机制改善调度质量。在空间维度上, 方差惩罚项对偏离均值越远的卫星施加越大的惩罚, 驱动优化器将任务从过载卫星重新分配至闲置卫星。在时间维度上, 跨 2 h 时段的方差最小化可防止多星可见窗口期间的竞争热点, 将部分任务从高峰时段推移至相邻的非高峰时段。

此外, 负载均衡还通过均衡分配隐式保留了导航所需的多星汇聚窗口, 而无须引入显式的几何约束。其内在逻辑为导航任务要求至少 3 颗卫星同时参与服务, 如果调度器将通信任务集中分配给多星汇聚窗口中的卫星, 则这些卫星的负载将远高于平均值。负载方差最小化恰好抑制了这种不均衡——优化器为降低过载卫星的负载, 会将部分通信任务转移出多星窗口时段, 从而自然地导航任务腾出服务容量。这使得冲突消除成为负载均衡的隐式结果, 避免了引入大量组合几何约束带来的模型规模膨胀。

3.2 约束描述

约束系统在强制执行操作要求的同时, 通过线性化处理保持 MILP 的可行性。

1) 决策变量。模型采用二元分配变量 $x_{ij}^t \in \{0, 1\}$ 表示任务 i 是否在时隙 t 分配给卫星 j ; 导航组合变量 $y_i^{\text{nav}}(\mathbf{S}, t) \in \{0, 1\}$ 表示多星组合 $\mathbf{S}$ 是否在时隙 t 为导航任务 i 提供服务; 任务完成指示变量 $z_i \in \{0, 1\}$; 连续负载变量 $L_j^s \in \mathbf{R}^+$ 表示每卫星每时段的累积工作负载。

2) 可见性约束。任务仅在卫星与用户之间存在未被月球球体遮挡的视线窗口期间可被分配, 见式 (15)。

$$x_{ij}^t \leq V_{ij}^t, \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (15)$$

式中, $V_{ij}^t \in \{0, 1\}$ 为可见性指示器, 由轨道传播与月球遮挡判断在预处理阶段计算获得。当 $V_{ij}^t = 0$ 时, 强制 $x_{ij}^t = 0$, 以确保任务分配的物理可行性。

3) 任务分配约束。通信任务在每个时隙最多由 1 颗卫星服务, 见式 (16)。

$$\sum_{j \in J} x_{ij}^t \leq 1, \quad \forall i \in C, t \in W_i \quad (16)$$

导航任务在每个时隙最多选择 1 个卫星组合, 见式 (17)。

$$\sum_s y_i^{\text{nav}}(S, t) \leq 1, \quad \forall i \in N, t \in W_i \quad (17)$$

为保持导航卫星组合选择与单星分配变量的一致性, 建立组合-单星一致性约束, 见式 (18)。

$$x_{ij}^t = \sum_{s: j \in S} y_i^{\text{nav}}(S, t), \quad \forall i \in N, j \in J, t \quad (18)$$

式 (18) 确保当某个导航卫星组合被激活时, 该组合中包含的所有卫星的单星分配变量也相应取值为 1, 使得负载计算能够准确反映导航任务对各卫星资源的占用。

4) 任务完成约束。完成指示变量 z_i 仅在累计服务时间满足持续时间要求时被允许取值为 1, 见式 (19)。

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in W_i} x_{ij}^t \geq D_i \cdot z_i, \quad \forall i \in I \quad (19)$$

式中, 当 $z_i = 1$ 时, 要求总服务时隙数不少于 D_i 。

5) 质量约束。服务质量须满足最低门限, 通信和导航见式 (20)。

$$\begin{cases} \text{通信:} \\ \text{CNR}_{ij}^t \cdot x_{ij}^t \geq \text{CNR}_{\min} \cdot x_{ij}^t, \quad \forall i \in C \\ \text{导航:} \\ \text{PDOP}_i(S) \cdot y_i^{\text{nav}}(S, t) \leq \\ \text{PDOP}_{\max} \cdot y_i^{\text{nav}}(S, t), \quad \forall i \in N \end{cases} \quad (20)$$

式中, $\text{CNR}_{\min}$ 为通信最低载噪比阈值; $\text{PDOP}_{\max}$ 为导航最大 PDOP 阈值。

6) 时段负载容量约束。每卫星每时段累积负

载不得超过最大容量, 见式 (21)。

$$L_j^s = \sum_{t \in T_s} \sum_{i \in I} w(\tau_i) \cdot x_{ij}^t \leq C_j^{\max}, \quad \forall j \in J, s \in S \quad (21)$$

该约束通过累积容量限制隐式规避通信与导航任务的资源冲突。当累积负载满足 $L_j^s \leq C_j^{\max}$ 时, 仍可实现通信与导航任务的时间交织并发执行。

3.3 基于 MILP 的模型重构

服务质量目标 F_1 、任务完成率目标 F_2 和导航效率目标 F_3 均为线性形式, 但负载均衡目标 F_4 中的非线性方差项 $(L_j^s - \bar{L}^s)^2$ 违反了 MILP 对目标函数线性的要求。本节通过 L1 范数替代与辅助变量分解技术, 将 F_4 转化为等价的线性形式。

原始负载均衡目标见式 (22)。

$$F_4^{\text{original}} = \frac{1}{|S|} \sum_{s \in S} \sigma^2(L^s) = \frac{1}{|S|} \sum_{s \in S} \frac{1}{|J|} \sum_{j \in J} (L_j^s - \bar{L}^s)^2 \quad (22)$$

式 (22) 包含关于决策变量的平方偏差项, 无法直接纳入 MILP 框架。采用 L1 范数替代 L2 范数, 用绝对偏差替代平方偏差^[26]得式 (23)。

$$F_4^{\text{L1}} = \frac{1}{|S| \cdot |J|} \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} |L_j^s - \bar{L}^s| \quad (23)$$

虽然 L1 范数并非统计意义上的严格方差最小化, 但在优化计算下二者具有等价的驱动效果: 最小化绝对偏差之和同样会迫使各卫星负载趋近于均值。为消除绝对值算子, 引入非负辅助变量 $d_j^{s+} \geq 0$ 和 $d_j^{s-} \geq 0$, 建立偏差分解约束, 见式 (24)。

$$L_j^s - \bar{L}^s = d_j^{s+} - d_j^{s-}, \quad \forall j \in J, s \in S \quad (24)$$

式中, d_j^{s+} 表示卫星 j 在时段 s 的累积负载高于平均负载的正偏差部分; d_j^{s-} 表示低于平均负载的负偏差部分。由此得到线性化目标, 见式 (25)。

$$F_4^{\text{linear}} = \frac{1}{|S| \cdot |J|} \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} (d_j^{s+} + d_j^{s-}) \quad (25)$$

该线性化在最优解处是精确的, 而非近似。证明如下: 假设在最优解处存在某个 (j, s) , 使得 $d_j^{s+} \geq 0$ 且 $d_j^{s-} \geq 0$ 同时成立, 令 $\varepsilon = \min(d_j^{s+}, d_j^{s-}) > 0$,

将两者同时减少 ε 仍满足偏差分解约束, 但目标值降低了 2ε , 与最优性矛盾。因此, 在最优时 d_j^{s+} 和 d_j^{s-} 至多有 1 个为正, 精确恢复绝对偏差值而不引入任何近似误差。

MILP 适用于本问题的原因在于: 任务分配决策本质上为二元变量, 运行约束均可表示为线性形式, 而负载方差目标通过 L1 范数可精确线性化。相较而言, 非线性规划方法难以有效利用问题的离散结构; 遗传算法、粒子群等元启发式方法缺乏全局最优保证, 在卫星资源紧缺条件下可能给出次优方案; 深度强化学习等数据驱动方法则需要大量训练样本。

3.4 完整模型汇总与求解流程

综上, 本文所建立的耦合任务调度优化模型可汇总为如下紧凑形式, 见式 (26)。

$$\begin{aligned} \max F = & W_1 \cdot F_1 + W_2 \cdot F_2 + W_3 \cdot F_3 - W_4 \cdot F_4^{\text{linear}} \\ \text{s.t. 式 (15) } \sim & \text{式 (22)} \\ & x_{ij}^t, y_i^{\text{nav}}(\mathbf{S}, t), z_i \in \{0, 1\}, \\ & L_j^s, d_j^{s+}, d_j^{s-} \geq 0 \end{aligned} \quad (26)$$

式中, F_1 至 F_3 分别由式 (8) ~ 式 (13) 定义; F_4^{linear} 由式 (25) 定义。该模型包含二元决策变量 (x, y, z) 和连续辅助变量 (L, d^+, d^-), 所有目标项和约束均为线性形式, 构成标准 MILP。

上述模型的求解分为 4 个阶段。

1) 预处理阶段。基于卫星星历数据进行轨道传播, 计算可见性矩阵 V_{ij}^t ; 在可见窗口内评估通信 CNR 预测值和导航卫星组合的 PDOP 值。对导航任务, 枚举所有可见卫星数不少于 3 颗的组合 $\mathbf{S}$, 筛除 PDOP 超出阈值的不可行组合。

2) 模型构建阶段。建立 MILP 模型算法, 输入预处理结果, 创建决策变量和辅助变量, 依次设置约束条件, 构建加权目标函数。在实现层面使用 Python 的 PuLP 建模接口。

3) 求解阶段。调用 COIN-OR Branchand Cut (CBC) 开源求解器, 参数配置为最优性间隙 MIPGap = 0.01, 时间限制根据问题规模动态设置: $N = 30$ 时为 600 s, $N = 50$ 时为 900 s, $N = 70$ 时为 1800 s, $N = 120$ 时为 3600 s。

4) 后处理阶段。从最优解中提取任务分配方案, 计算性能指标包括任务完成率、各时段各卫

星累积负载分布及变异系数 (Coefficient of Variation, CV) 等。

4 仿真验证

4.1 仿真设置

为评估所提耦合全局规划方法的可扩展性与鲁棒性, 本文针对 4 个任务规模开展实验。所有任务集均采用统一随机种子生成, 以确保可重复性, 并在各规模下保持约 54.5:45.5 的通信与导航任务比例。任务用户位置分布于月球南极附近区域 (纬度 -80° 至 -90°), 服务窗口基于可见性约束在 1~2 h 区间内随机生成。通信任务服务时长约 5 min, 导航任务时长约 10 min。服务质量要求在可接受操作范围内随机生成: 通信任务的 CNR 阈值为 11~13 dB, 导航任务的 PDOP 阈值为 3.0~4.0。任务时序分布呈现显著峰值需求——月球当地时间 12:00 至 16:00 时段的并发任务数在 $N = 120$ 时超过 20 项。

卫星星座采用 8 颗 ELFO 卫星^[27], 具体轨道参数详见表 1。轨道周期为 12 h, 近月点高度 300 km, 近月点幅角 90° , 可实现对测试区域 80%~87.2% 的覆盖率。所有 MILP 模型均通过 PuLP 建模接口实现, 并使用 CBC 开源求解器在 AMD Ryzen 75800H 处理器 (3.20 GHz, 16 GB 内存) 上求解。求解器参数配置为 MIPGap = 0.01, 不同规模对应的时间限制分别为 600 s、900 s、1800 s 和 3600 s。基准方案采用两阶段分离规划: 第一阶段优化通信任务并兼顾负载均衡, 第二阶段在剩余容量上调度导航任务, 不修改第一阶段决策。

表 1 星座卫星轨道元素
Table 1 Orbital elements of constellation satellites

ELFO	RAAN/ ($^\circ$)	TA/ ($^\circ$)
1	0	0
2	0	180
3	90	45
4	90	225
5	180	90
6	180	270
7	270	135
8	270	315

4.2 任务完成率

图 2 展示了不同规模与服务类型的完成率对比。由图 2 (a) 的整体任务完成率可知, 耦合规划在所有规模下均优于分离规划, 4 个规模的平均

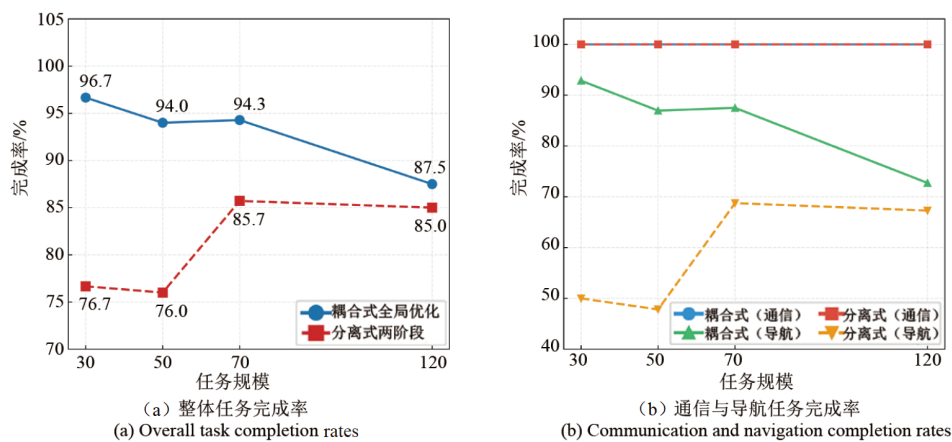


图 2 不同规模下的任务完成率对比

Fig. 2 Comparison of task completion rates across scales

提升幅度达 12.3%。

服务特异性分析 (图 2 (b)) 揭示了优势的来源。2 种方法的通信完成率均接近 100%, 因为通信任务仅需单颗卫星服务。性能差异集中体现在导航任务上, 差距直接源于多星汇聚窗口的保留机制——分离规划中通信任务在第一阶段已占据多星汇聚时段的大部分容量, 耦合规划通过负载方差最小化将通信任务分散到单星覆盖时段, 为导航任务保留了充足的多星服务机会。在更大规模下, 优势逐渐减弱, 因为任务密度接近星座容量上限。

表 2 汇总了综合性能指标。从求解时间来看, 2 种方法在同一规模下的时间差不超过 5%, 说明耦合规划的性能优势并非以额外计算代价换取的。

4.3 负载均衡

图 3 展示了 CV 分布对比。耦合规划在所有规模下均实现更低的 CV 值。图 4 展示了 $N=120$ 时的时空负载分布。图 4 (a) 表明, 耦合规划保持均衡分布, 累积负载在 50~150 单位之间, CV 为

表 2 多任务规模下综合性能对比

Table 2 Comprehensive performance comparison across task scales

任务规模	总完成率/%		导航完成率/%		变异系数 CV		求解时间/s	
	耦合式	分离式	耦合式	分离式	耦合式	分离式	耦合式	分离式
30	96.7	76.7	92.9	50.0	0.041	0.360	589.4	598.5
50	94.0	76.0	87.0	47.8	0.054	0.062	890.4	883.3
70	94.3	85.7	87.5	68.8	0.036	0.085	1785.9	1779.7
120	87.5	85.0	72.7	67.3	0.068	0.201	3577.6	3671.8

0.068。图 4 (b) 表明, 分离规划在高峰时段 (14:00 至 16:00) 出现严重集中, 卫星 4 与 5 负载接近 600 单位。差异图 (图 4 (c)) 清晰揭示了再平衡机制: 时域重分配将任务从拥堵高峰时段转移至相邻低谷时段, 空间重分配将负载从卫星 4 与 5 扩散至整个星座。

4.4 讨论

1) 双维度性能关联分析。综合 4.2 节和 4.3 节结果, 耦合规划方法在任务完成率和负载均衡 2 个维度上同时优于分离规划, 这源于负载均衡优化对多星汇聚窗口的隐式保护机制。该机制的作

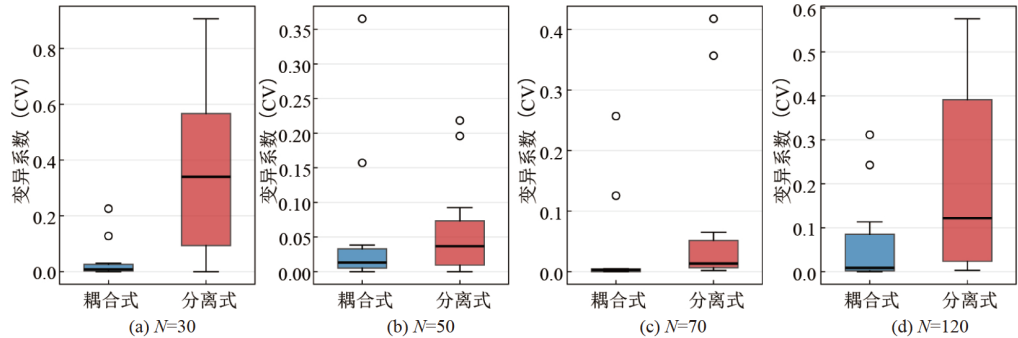
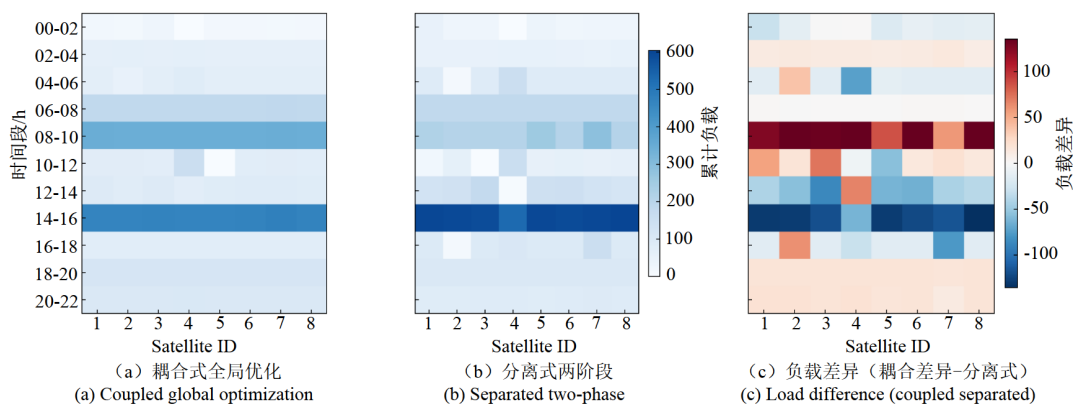


图 3 不同任务规模下的变异系数 (CV) 分布

Fig. 3 Distribution of Coefficient of Variation (CV) across task scales

图 4 卫星负载分布热力图 ($N=120$)Fig. 4 Satellite load distribution heatmap ($N=120$)

用链路为：负载方差最小化→通信任务从高峰时段和过载卫星分散→多星汇聚窗口中的卫星容量被释放→导航任务获得充足的多星服务机会→导航完成率提升→总完成率提升。

图 5 将任务完成率与负载均衡变异系数置于同一坐标系中，直观呈现了上述双维度关联。图中右下角区域（高完成率、低 CV）为理想工作区域。耦合规划在所有规模下均位于分离规划的右下方，表明其同时实现了更高的任务完成率和更优的负载均衡。随着任务规模增大，2 种方法的散点均向左上方移动（完成率下降、CV 上升），但耦合规划的移动幅度显著小于分离规划，体现了其在资源紧张条件下的鲁棒性。

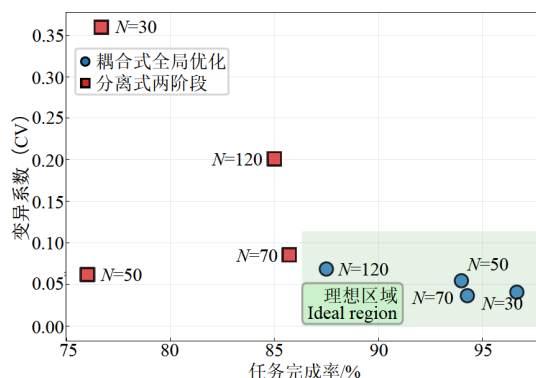


图 5 任务完成率与负载均衡双维度对比

Fig. 5 Dual-dimension comparison of task completion and load balance

在 $N=30$ 的小规模场景中，分离规划将通信任务集中在多星窗口，导致导航完成率仅为 50.0%；耦合规划通过负载重分配释放了这些窗口，导航完成率提升至 92.9%。在 $N=120$ 的大规模场景中，任务密度接近星座容量上限，瓶颈从

“分配不当”转变为“资源绝对不足”，改善幅度缩小至 5.4%。

2) 方法局限性。本文所建立的确定性模型假设所有任务参数在规划时刻已知。在实际月球探测场景中，突发任务的到达时间具有不确定性，需引入随机优化或在线调度扩展来处理动态任务生成。负载权重参数 $w_c = 1.2$ 、 $w_n = 1.0$ 以及 2 h 的时段长度是基于当前 ELFO 架构的经验校准值，不同轨道构型需重新标定。

3) 求解效率与可扩展性。CBC 开源求解器在 $N=120$ 时求解时间约 3600 s，最优性间隙低于 2%。对于更大规模场景，有 2 条效率提升路径。其一，采用商用求解器（如 Gurobi 或 CPLEX）替代 CBC——本文 MILP 模型通过 PuLP 接口实现，支持多种求解器即插即用切换，无须修改模型结构。商用求解器性能通常优于开源求解器数倍至一个数量级。其二，结合问题结构设计加速算法：利用时段独立性进行问题分解，采用列生成处理导航卫星组合的枚举爆炸，或采用滚动时域规划将长周期问题拆分为短周期子问题。

5 结论

针对月球星座中通信与导航服务因共享硬件而产生的设备级资源耦合问题，本文提出了基于负载均衡的 MILP 全局优化调度框架，以替代传统的分离式顺序规划方法。结论如下：

1) 建立了分层耦合抽象模型。通过加权聚合将天线互斥、功率竞争和计算资源竞争 3 个物理维度的异构资源消耗映射为统一的标量负载度量，以差异化权重反映 2 种服务的资源消耗差异。采用 2 h 时段分段将瞬时互斥约束转化为累积容量

约束, 约束数量较逐时隙建模降低约 120 倍, 在保持耦合关系本质刻画的同时显著提升了模型的可处理性。

2) 设计了负载均衡驱动的耦合解决方法。以负载方差最小化作为核心优化目标, 通过 L1 范数辅助变量分解技术实现了非线性方差项的精确线性化, 使完整模型纳入标准 MILP 框架。该方法采用空间重分配和时间重分配的双重机制, 无须引入显式几何约束即可自动保留导航所需的多星汇聚窗口, 冲突消除成为负载均衡的隐式结果。

3) 多规模仿真验证了所提方法的有效性。在 30~120 任务规模下, 耦合规划的总完成率平均提升 12.3%。负载均衡 CV 在所有规模下均优于分离规划, $N=30$ 时从 0.360 降至 0.041 (改善 88.7%)。通信完成率在 2 种方法下均接近 100%, 证明耦合规划的导航改善并非以牺牲通信性能为代价。

以上结果表明, 对于 8 星 ELFO 星座, 在任务规模不超过 120 的条件下, 耦合规划可在约 3600 s 内获得近优解, 建议在实际月球星座任务规划中优先采用耦合规划替代分离规划, 尤其在任务规模较小且多星窗口紧缺的场景下, 效果最为显著。后续工作将研究任务到达不确定性的在线调度方法, 以及面向更大规模场景的高效求解策略。

参考文献 (References)

- [1] Smith M, Craig D, Herrmann N, et al. The artemis program: An overview of NASA's activities to return humans to the moon[C]//2020 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2020: 1-10.
- [2] Hu T, Yang Z, Li M, et al. Possible sites for a Chinese international lunar research station in the lunar south polar region[J]. Planetary and Space Science, 2023, 227: 105623.
- [3] Athanasopoulos H K. The moon village and space 4.0: The 'open concept' as a new way of doing space?[J]. Space Policy, 2019, 49: 101323.
- [4] Martinez Rocamora Jr B, Kilic C, Tatsch C, et al. Multi-robot cooperation for lunar in-situ resource utilization[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2023, 10: 1149080.
- [5] Parker J S, Anderson R L. Low-energy Lunar Trajectory Design [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014: 3-12.
- [6] 王晓伟, 詹亚锋, 谢浩然, 等. 通导一体化环月星座设计初探[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45 (1): 241-249.
Wang X W, Zhan Y F, Xie H R, et al. A preliminary study on the design of constellation orbiting the Moon with the communication and navigation integration[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45 (1): 241-249 (in Chinese).
- [7] 杜永浩, 邢立宁, 姚锋, 等. 航天器任务调度模型、算法与通用求解技术综述[J]. 自动化学报, 2021, 47 (12): 2715-2741.
- [8] Du Y H, Xing L N, Yao F, et al. Survey on models, algorithms and general techniques for spacecraft mission scheduling[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47 (12): 2715-2741 (in Chinese).
- [8] 向尚, 陈盈果, 李国梁, 等. 卫星自主与协同任务调度规划综述[J]. 自动化学报, 2019, 45 (2): 252-264.
- [9] Xiang S, Chen Y G, Li G L, et al. Review on satellite autonomous and collaborative task scheduling planning[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45 (2): 252-264 (in Chinese).
- [9] Chen X, Reinelt G, Dai G, et al. A mixed integer linear programming model for multi-satellite scheduling[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 275 (2): 694-707.
- [10] Hebrard E, Huguet M J, Veyssiere D, et al. Constraint programming for planning test campaigns of communications satellites[J]. Constraints, 2017, 22 (1): 73-89.
- [11] 杜永浩, 邢立宁, 陈盈果, 等. 卫星任务调度统一化建模与多策略协同求解方法[J]. 控制与决策, 2019, 34 (9): 1847-1856.
- [11] Du Y H, Xing L N, Chen Y G, et al. Unified modeling and multi-strategy collaborative optimization for satellite task scheduling[J]. Control and Decision, 2019, 34 (9): 1847-1856 (in Chinese).
- [12] Wu J, Song B, Zhang G, et al. A data-driven improved genetic algorithm for agile earth observation satellite scheduling with time-dependent transition time[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 174: 108823.
- [13] Zhang Z, Dong T, Yin J, et al. A particle swarm optimization-based queue scheduling and optimization mechanism for large-scale low-earth-orbit satellite communication networks[J]. Sensors, 2025, 25 (4): 1069.
- [14] Herrmann A, Schaub H. A comparative analysis of reinforcement learning algorithms for earth-observing satellite scheduling[J]. Frontiers in Space Technologies, 2023, 4: 1263489.
- [15] 李可, 熊顺蕊, 戴朋林, 等. 基于深度强化学习的卫星动态任务实时调度时效性优化方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54 (10): 2443-2469.
- [15] Li K, Xiong S R, Dai P L, et al. Timeliness optimization of real-time scheduling for satellite dynamic tasks based on deep reinforcement learning[J]. Scientia Sinica Informationis, 2024, 54 (10): 2443-2469 (in Chinese).
- [16] Sheng M, Zhou D, Bai W, et al. Coverage enhancement for 6G satellite-terrestrial integrated networks: Performance metrics, constellation configuration and resource allocation[J]. Science China Information Sciences, 2023, 66 (3): 130303.
- [17] Deng X, Chang L, Zeng S, et al. Distance-based backpressure routing for load-balancing LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72 (1): 1240-1253.
- [18] Vanoutryve B, De Rosa D, Fisackerly R, et al. An analysis of illumination and communication conditions near lunar south pole based on Kaguya data[C]//Proceedings of International Planetary Probe Workshop. Barcelona, Spain, 2010: 1-7.
- [19] Mahmood A, Abdallah A M, Baharom B B, et al. Ensuring satellite operational integrity: A power budget analysis for next generation satellites[J]. IEEE Access, 2025, 13: 38498-

- 38517.
- [20] Serria E, Gadhaifi R, AlMaenei S, et al. A review of lunar communications and antennas: Assessing performance in the context of propagation and radiation[J]. *Sensors*, 2023, 23 (24) : 9832.
- [21] Liu Z, Xiong W, Jia Z, et al. Two-stage deep reinforcement learning method for agile optical satellite scheduling problem[J]. *Complex & Intelligent Systems*, 2025, 11 (1) : 35.
- [22] Reinhart R. Lunar communications and navigation: Lunar communications, position, navigation, and time (CPNT) architecture[C]//Glenn Space Technology Symposium. Cleveland: AAS, 2024.
- [23] Kaplan E D, Hegarty C. Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications[M]. 3rd ed. Boston: Artech House, 2017.
- [24] Furringer M P, Clifton R S, Thompson T G. Efficient and accurate evolutionary multi-objective optimization paradigms for satellite constellation design[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2007, 44 (3) : 682-691.
- [25] Cortinovis M, Mina T, Gao G. Assessment of single satellite-based lunar positioning for the NASA endurance mission[C]//2024 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2024: 1-11.
- [26] Bektas S, Sisman Y. The comparison of L1 and L2-norm minimization methods[J]. *International Journal of the Physical Sciences*, 2010, 5 (11) : 1721-1727.
- [27] Murata M, Akiyama K, Naoki S. Lunar navigation satellite system for entire moon surface: HDOP and SISE evaluation [C]//Proceedings of the 2024 International Technical Meeting of the Institute of Navigation. Long Beach: ION, 2024: 778-786.
- (责任编辑: 高慧)