

基于分层协同架构的天地一体化动态链路管理

王浩楠¹, 彭攀¹, 郁宏伟², 万松², 陶卫^{1,3*}

(1. 上海交通大学自动化与感知学院, 上海 200240;

2. 上海西虹桥导航技术有限公司, 上海 201702;

3. 上海市北斗导航与位置服务重点实验室, 上海 200240)

摘要:天地一体化信息网络被视为第六代移动通信技术的关键组成部分。然而,实际部署中卫星馈电链路终端资源受限且地面业务流量时空分布不均,使得网络链路管理面临显著挑战。针对上述问题,本文提出一种基于分层协同架构的天地一体化动态链路管理策略。该策略通过构建两阶段分层协同机制,将高维全局联合优化问题解耦为星地接入层与星间拓扑层两个关联子任务。对于星地接入层,采用多智能体近端策略优化算法,实时感知以人口热点表征的地面业务需求,实现链路资源的按需调度;对于星间拓扑层,通过自底向上的流量热度反馈,驱动优势演员-评论家智能体对星间激光链路拓扑进行动态重构,降低无效能耗。仿真结果表明,所提策略在维持1.33%低阻塞率与310.44 Gbps网络容量的条件下,相较全连接基准拓扑可降低32%的能耗,并将网络资源利用效率提升至基准方法的1.81倍,验证了该方法在大规模动态场景下的有效性与稳定性。

关键词:天地一体化信息网络;分层协同架构;动态链路管理;多智能体强化学习

中图分类号:TN927.2 文献标识码:A

Dynamic link management for space-ground integrated systems based on hierarchical collaborative architecture

WANG Haonan¹, PENG Pan¹, YU Hongwei², WAN Song², TAO Wei^{1,3*}

(1. School of Automation and Intelligent Sensing, Shanghai Jiao Tong University,
Shanghai 200240, China;

2. Shanghai West Hongqiao Navigation Technology Co., Ltd., Shanghai 201702, China;

3. Shanghai Key Laboratory of Navigation and Location Based Services, Shanghai 200240, China)

* Corresponding author, E-mail: taowei@sjtu.edu.cn

Abstract: Space-ground integrated information networks are key infrastructures for sixth-generation (6G) communications. They can provide wide coverage, high capacity, and flexible global access. However, practical link management still faces two coupled challenges. Satellite feeder terminals are limited by on-board payload resources. Terrestrial traffic also shows strong spatial and temporal heterogeneity. These factors cause access congestion, redundant inter-satellite links, and inefficient energy use. To address these problems, this paper proposes a hierarchical collaborative dynamic link management strategy. The

strategy decomposes the global joint optimization problem into two related subtasks. The first subtask is satellite-ground access scheduling. The second subtask is inter-satellite topology reconstruction. For the access layer, a Multi-Agent Proximal Policy Optimization algorithm is developed. It uses satellite ephemeris, link visibility, link distance, connection history, and population weights. Thus, limited ground-satellite link resources can be allocated to high-demand regions. For the coupling layer, a traffic heat estimation model is constructed. It maps terrestrial population demand to satellite nodes through established access links. It then diffuses traffic heat over the inter-satellite topology with hop attenuation. For the topology layer, an Advantage Actor-Critic agent is introduced. It uses traffic heat, historical link states, backbone masks, and node-degree constraints. The agent selectively disables low-load redundant laser inter-satellite links. It also preserves critical paths and maintains basic network connectivity. A Walker Delta constellation with 484 low-Earth-orbit satellites is simulated. The ground segment contains 100 major cities as traffic sources. The results show a blocking rate of 1.33%. The quality-of-service-constrained network capacity reaches 310.44 Gbps. Compared with the full-mesh baseline, energy consumption is reduced by 32%. The normalized resource utilization efficiency increases to 1.81 times the baseline. The average link handover ratio remains only 1.22% per slot. These results show that the proposed strategy improves capacity and energy efficiency. They also confirm its robustness in large-scale dynamic satellite network scenarios.

Key words: space-ground integrated information networks; hierarchical collaborative architecture; dynamic link management; multi-agent reinforcement learning

1 引言

随着激光通信技术的成熟,低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)天地一体化信息网络凭借大容量^[1]、低时延^[2]及广覆盖优势^[3],成为了支撑6G全域通信的关键基础设施^[4]。Starlink等星座的规模化部署已实现超万颗卫星的发射^[5],印证了LEO天地一体化信息网络是6G通信的核心发展趋势^[6]。

然而,卫星馈电链路终端数目受限与地面业务时空分布不均带来两大挑战:一方面,馈电资源制约星地链路(Ground-Satellite Links, GSL)高效分配,地面站密集区易拥塞^[7],且卫星高速运动导致GSL快速变化,增加信令开销^[8]与信道波动^[9];另一方面,地面需求分布不均使网络负载难以均衡^[10],海洋、沙漠等低流量区域常开的星间激光链路(Inter-Satellite Links, ISL)造成星上能量浪费,直接影响电池容量与有效载荷设计^[11]。因此,优化ISL能量效率具有重要意义^[12]。

近年来,针对天地一体化信息网络中卫星节点高速运动、链路时变和资源受限等问题,国内外研究人员已从星地接入调度^[13]、星间拓扑优化^[14]以及智能化资源管理^[15]等方面开展了系统

研究。

在星地接入调度方面,现有工作主要围绕链路接入选择和馈电资源分配展开。Song等^[16]提出基于信道状态感知的切换管理机制,以提高数据交付率并降低切换时延。Bello等^[17]面向异构卫星网络设计增强粒子群优化算法,实现呼叫准入控制和负载均衡。上述方法虽能够在一定程度上提升星地接入效率,但其优化目标多集中于接入链路本身,缺乏星地接入决策对后续星间转发负载、路由路径选择和全网资源利用率的考虑。

在星间链路拓扑构建方面,相关研究主要关注拓扑连通性、链路负载均衡和网络能效优化。Wang等^[18]提出空间对称链路移除策略,在保持拓扑完整性的基础上缓解热点链路拥塞。Wang等^[19]进一步面向异构轨道协作场景,构建基于联邦强化学习的异步分层架构,通过动态关闭低负载链路提升网络能效。这类方法为降低星间链路冗余和提升能量利用效率提供了有效思路,但多数研究仍以星间拓扑为独立优化对象,对地面业务时空分布、星地接入状态及其对星间流量演化的耦合作用考虑不足。同时,频繁链路开关可能引发路由震荡和捕获跟踪对准开销,影响动态

拓扑的实际可部署性。

随着深度强化学习在复杂网络资源管理中的应用,部分研究开始利用智能决策方法处理天地一体化网络中的高维、非凸和混合动作空间优化问题。Huang等^[20]结合DQN与PPO方法,分别处理离散资源分配和连续功率控制。Hassan等^[21]将元启发式优化与MAPPO相结合,用于提升6G Sub-THz卫星网络的覆盖性能和数据速率。强化学习方法在动态场景中具有较强的自适应能力,但若直接对星地接入、星间拓扑和路由资源进行全局联合优化,将导致状态空间和动作空间过大,进而增加训练复杂度和策略收敛难度。

综上所述,现有研究分别在星地接入优化、星间链路控制和智能资源调度方面取得了重要进展,但仍存在两个不足:一是星地接入与星间拓扑规划多被分解为相互独立的问题,缺少由业务注入到星间转发的跨层协同机制^[22];二是现有星间链路开关策略在追求能效提升时,对业务热点迁移、拓扑稳定性和链路重构开销的联合约束仍不充分^[23]。

针对上述问题,本文构建分层协同动态链路管理架构,将全局联合优化问题解耦为星地接入选择和星间拓扑重构两个关联子任务,并通过流量热度反馈实现GSL层与ISL层之间的信息传递,从而在降低优化维度的同时提升网络容量、能效和拓扑稳定性。

2 天地一体化信息网络模型与优化问题构建

本章建立天地一体化网络模型需包括网络架构、可视性约束、链路容量和业务生成模型,并将GSL/ISL协同调度建模为多目标混合整数非线性规划问题。

2.1 天地一体化信息网络架构

本研究采用典型的Walker Delta低轨卫星星座构型,由 N_o 个轨道、每轨道 N_m 颗均匀分布的 N_{sat} 颗卫星 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{N_{\text{sat}}}\}$ 组成,为 N_g 个地面站 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_{N_g}\}$ 提供服务。在天地一体化网络中,GSL的动态调度面临着严苛的物理资源瓶颈。首先,由于卫星平台载荷限制,每颗卫星 s_i 只

能同时为两个地面站提供服务。通信终端数量导致的资源约束使系统无法满足所有潜在的连接请求,需通过智能决策实现有限资源的最优分配。

其次,GSL的建立严格受限于卫星与地面的几何可见性。在 t 时隙,定义GSL的连接决策变量为 $x_{i,k}(t) \in \{0, 1\}$,当卫星 s_i 与地面站 g_k 建立连接时为1,否则为0。如图1所示,地面站观测卫星的实际仰角必须大于最小仰角阈值 θ_{min} ,定义可见性指示变量 $v_{i,k}(t) \in \{0, 1\}$,仅当 $v_{i,k}(t) = 1$ 时卫星 s_i 与地面站 g_k 允许建立连接。假设地球半径为 R ,低轨卫星轨道高度为 H ,地面站与卫星间距离 $d_{s,g}(t)$ 为^[24]:

$$d_{s,g}(t) = \sqrt{R^2 + (R + H)^2 - 2R(R + H) \cos \varphi_{s,g}}, \quad (1)$$

其中: $\varphi_{s,g}$ 为卫星与地面站的地心角。由于LEO卫星的高速运动,上述可见性指示 $v_{i,k}(t)$ 会频繁变化,因此需在GSL链路调度时考虑当前链路的可见时长,避免链路无效切换开销。

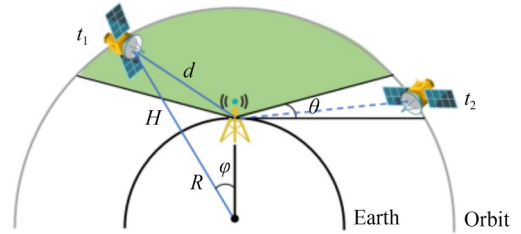


图1 卫星与地面站可见性示意图

Fig. 1 Schematic diagram of satellite-ground station visibility

天地一体化信息网络架构如图2所示,网络中所有卫星都以相同的轨道周期沿着轨道平面连续运行,同轨道卫星构成轨道内链路intra-ISL,相邻轨道间卫星构成轨道间链路inter-ISL,定义卫星 s_i 与 s_j 的ISL连接决策变量为 $y_{i,j}(t) \in \{0, 1\}$ 。由于激光通信终端数目限制,设置每颗卫星最多同时建立两条轨道内ISL(intra-ISL)和两条轨道间ISL(inter-ISL)^[25]。在 t 时隙内,认为ISL与GSL拓扑不变,所有链路切换均发生在通信时隙之间^[26]。在地面站分布密集的区域,由于上述卫星资源的紧张,可能存在地面站在某时隙没有卫星提供通信服务。本文设定该部分数据

将通过地面网络中继至已建链路的地面站进行上传^[27]。

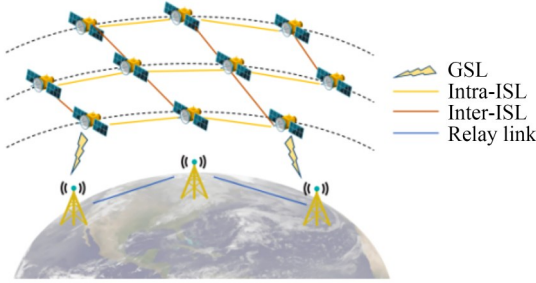


图2 天地一体化信息网络架构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of space-ground integrated information networks architecture

2.2 通信业务模型

本节构建GSL容量模型和业务生成模型,刻画链路容量变化与业务空间非均匀分布。

2.2.1 GSL容量模型

本文将GSL信道容量作为链路调度性能的核心评估指标。GSL信号传播受自由空间路径损耗与大气衰减影响。根据GSL实时距离,计算通信信号在传播过程中的自由空间路径损耗 L_{GSL} ($d_{s,g}$),如下所示:

$$L_{\text{GSL}}(d_{s,g}) = \left(\frac{4\pi d_{s,g}(t) f_c}{c} \right)^2, \quad (2)$$

其中: c 表示光速, f_c 表示载波频率。

综合考虑地面站与卫星的发射功率、天线增益与信道带宽,信噪比SNR可根据文献^[28]构建,如下所示:

$$\text{SNR} = \frac{P_s \cdot G_{s,g} \cdot G_r \cdot G_{\text{rain}}}{L_{\text{GSL}}(d_{s,g}) \cdot B_{\text{GSL}} \cdot N_0}, \quad (3)$$

其中: P_s 表示发射端功率, $G_{s,g}$, G_r 和 G_{rain} 分别代表地面站天线增益、卫星天线增益和雨衰, B_{GSL} 表示载波带宽, N_0 代表噪声功率谱密度。

根据香农公式可得,GSL信道容量 C_{GSL} 如下所示:

$$C_{\text{GSL}} = B_{\text{GSL}} \log_2 \left(1 + \frac{P_s \cdot G_{s,g} \cdot G_r \cdot G_{\text{rain}}}{L_{\text{GSL}}(d_{s,g}) \cdot B_{\text{GSL}} \cdot N_0} \right). \quad (4)$$

上述GSL容量模型反映GSL信道容量对空间距离与环境衰落等因素敏感,进行链路调度时需在就近接入降低路径损耗与跨区接入缓解热点拥塞之间进行平衡。

2.2.2 地面业务生成模型

通信流量空间分布不均是导致卫星网络局部拥塞与能效低下的根本原因。为真实反映这一特性,采用基于引力模型的业务生成方法。定义地面站之间的通信请求到达过程服从泊松分布,单次请求 r 的带宽需求 b_{req} 服从均匀分布 $U(b_{\text{min}}, b_{\text{max}})$,地面站 g_i 与 g_j 之间的通信业务量 $T_{i,j}$ 与二者所在城市的人口规模正相关,与距离负相关,即^[29]:

$$T_{i,j} = A \frac{P_i \cdot P_j}{D_{i,j}}, \quad (5)$$

其中: A 表示修正系数, P_i 和 P_j 分别代表城市 i 和 j 的人口数, $D_{i,j}$ 表示两城市间距离,该模型有效模拟了热点区域的突发流量特征。

2.3 全局联合优化问题构建

本文动态链路管理的核心目标是在资源受限与高动态卫星网络拓扑下实现地面业务需求与全网通信资源的最优匹配。将GSL接入选择与ISL拓扑重建建模为一个离散时间序列上的混合整数非线性规划问题。为方便叙述,将2.1节中定义的链路连接状态变量聚合为GSL接入决策矩阵 $\mathbf{X}(t) = [x_{i,k}(t)]_{\text{Nsat} \times \text{Ng}}$ 与ISL拓扑决策矩阵 $\mathbf{Y}(t) = [y_{i,k}(t)]_{\text{Nsat} \times \text{Nsat}}$ 。在此基础上,构建离散时间序列上的混合整数非线性规划(Mixed-Integer Nonlinear Programming, MINLP)优化问题。

本文的动态链路管理目标是在最大化全网通信服务效用(网络吞吐量与热点覆盖)的同时,最小化不必要的系统能耗与拓扑重构开销。因此,构建如下所示的多目标联合优化函数:

$$f = \max_{\mathbf{X}, \mathbf{Y}} \sum_{t \in T} [\alpha \cdot f_{\text{serv}}(\mathbf{X}(t)) - \beta \cdot f_{\text{eng}}(\mathbf{Y}(t)) - \gamma \cdot f_{\text{cost}}(\mathbf{X}(t), \mathbf{Y}(t))], \quad (6)$$

其中:网络服务效用 $f_{\text{serv}}(\mathbf{X}(t))$ 为衡量GSL策略对地面高人口密度的流量热点覆盖匹配度;

ISL能耗代价 $f_{\text{eng}}(\mathbf{Y}(t))$ 仅能通过太阳能帆板获取的星上能源,供给能力受限,而激光通信终端功耗较高,能耗代价旨在鼓励构建稀疏高效拓扑。 t 时隙的能耗代价与当前激活星间链路总数 $\sum_{i,j} y_{i,j}(t)$ 成正比,如下所示:

$$f_{\text{energy}}(\mathbf{Y}(t)) = P \cdot \sum_{i,j} y_{i,j}(t), \quad (7)$$

其中: P 表示激光通信终端功率;由于频繁的链路通断会引发路由震荡,并增加捕获与跟踪系统开

销。定义重构开销 $f_{\text{cost}}(X(t), Y(t))$ 建模为相邻时隙间决策矩阵的汉明距离,如式(8)所示:

$$f_{\text{cost}}(t) = \sum_{i,k} |x_{i,k}(t) - x_{i,k}(t-1)| + \eta \sum_{i,j} |y_{i,j}(t) - y_{i,j}(t-1)|, \quad (8)$$

其中: α, β, γ 为归一化权重, η 为星间与星地切换开销的相对权重。

上述建模将网络链路管理问题形式化为高维离散空间下的多目标优化问题。该问题具有高维状态-动作空间,传统方法难以有效

求解,因此本文采用分层强化学习框架进行优化。

3 分层协同架构动态链路优化

天地一体化网络拓扑高动态、业务分布复杂,传统静态或单层方法难以兼顾容量、能效和稳定性。为解决这一问题,本文提出一种基于分层协同架构的动态链路管理策略。该策略将全局链路管理问题划分为低复杂度关联子任务,以降低优化维度,如图3所示。

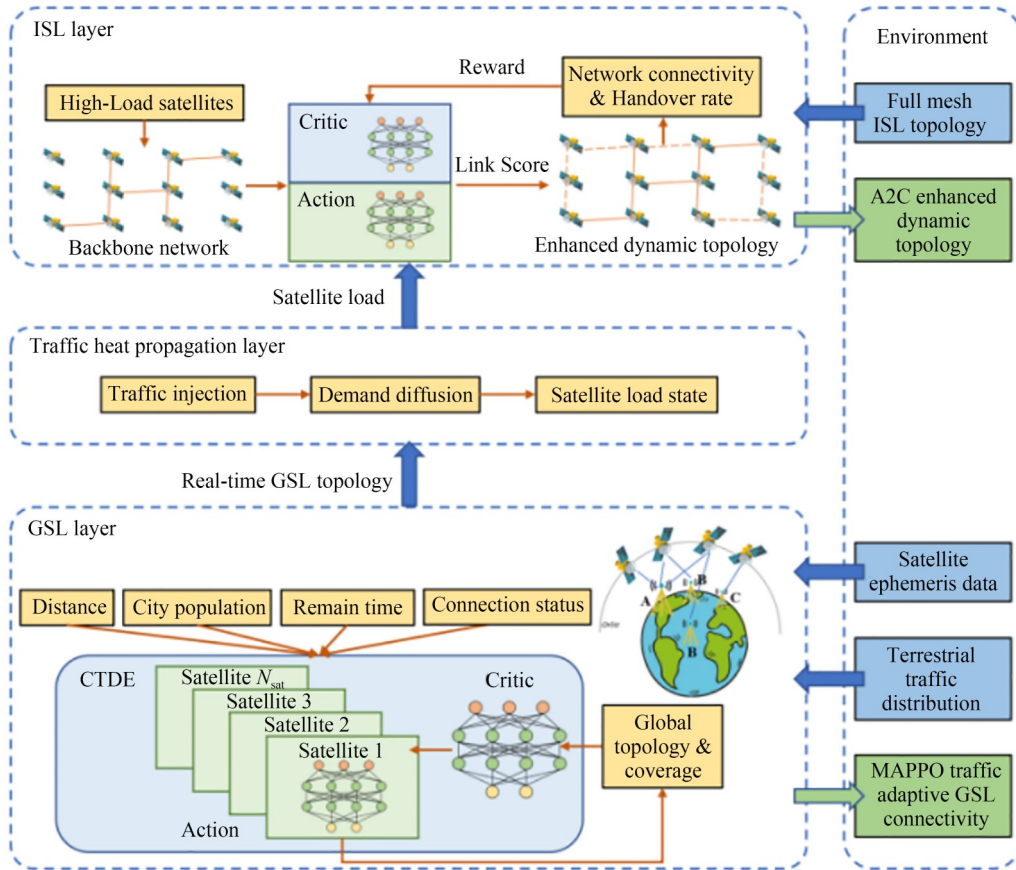


图3 动态链路管理架构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of dynamic link management architecture

在GSL层,采用MAPPO算法并基于集中式训练和分布式执行(Centralized Training and Decentralized Execution, CTDE)架构综合考虑链路信道质量与通信需求,优化GSL连接;耦合层通过流量热度扩散机制将底层建立的连接状态转化为卫星负载估计,为上层提供精准的全局环境感知;最后,基于估计负载热度,ISL层采用A2C

算法对全连接拓扑进行智能剪枝与动态重构,构建A2C增强动态拓扑。该设计降低了状态空间维度,并通过跨层协同提升全网资源利用率。

3.1 GSL接入选择层

3.1.1 MAPPO状态与动作空间设计

本文将GSL接入问题建模为分布式部分,可观察马尔可夫决策过程,由元组 $\langle S_{\text{GSL}}, O_{\text{GSL}} \rangle$,

$A_{\text{GSL}}, R_{\text{GSL}}, \gamma_{\text{GSL}}$ 定义, 以下为 GSL 层关键参数设计:

(1) 状态与观测 ($S_{\text{GSL}}, O_{\text{GSL}}$): 全局状态 $s_{\text{GSL}}(t) \in S_{\text{GSL}}$ 包含全网卫星与地面站的实时星历位置 (Satellite Ephemeris Data)、连接矩阵及全网流量分布 (Terrestrial Traffic Distribution), 用于 Critic 网络训练。对于卫星 s_i , 其 Actor 网络仅能获取局部观测 $o_i(t) \in O_{\text{GSL}}$ 。为处理变长输入, 观测向量由其视场内 K_{max} 个候选地面站的特征矩阵构成, 如下所示:

$$o_i(t) = [D_{i,k}, T_{i,k}^{\text{rem}}, I_{i,k}^{\text{hist}}, P_k], \quad (9)$$

其中: $D_{i,k}$ 为归一化的每时隙星地距离, 表征信道质量, $T_{i,k}^{\text{rem}}$ 为归一化的剩余可见时长, 用于预测链路寿命, $I_{i,k}^{\text{hist}}$ 为上一时隙连接状态标志, 用于保持链路连续性, 以减少不必要的切换开销, P_k 为地面站所在城市归一化后的人口权重, 使智能体具备感知地面热点流量分布的能力。

(2) 动作空间 A_{GSL} : 为满足单星馈电终端约束, 卫星 s_i 的动作 $a_i(t)$ 定义为依据当前可见指示变量 $v_{i,k}(t)$ 选择 $k \leq 2$ 个目标地面站进行连接, 构成一个受限的组合离散动作空间。

(3) 奖励函数 R_{GSL} : 为引导智能体在覆盖广度、链路质量与稳定性之间取得平衡, 设计了多目标加权奖励函数 $r_i(t)$, 如下所示:

$$r_i(t) = \sum_{k \in \mathcal{G}} (w_{\text{pop}} P_k x_{i,k}(t) - w_{\text{dist}} d_{i,k}(t) x_{i,k}(t) - w_{\text{HO_GSL}} |x_{i,k}(t) - x_{i,k}(t-1)|), \quad (10)$$

其中: $|x_{i,k}(t) - x_{i,k}(t-1)|$ 表征相邻时隙的 GSL 切换行为。

3.2 卫星流量估计耦合层

为在缺乏实时业务流数据时识别低效节点与链路, 构建基于人口分布和拓扑连通性的流量预估耦合层。该机制模拟通信需求从地面向空间网络注入, 并在星间链路扩散的过程。通过预估卫星节点流量, 为后续的 ISL 剪枝决策提供依据。

流量来源于地面用户需求, 以城市人口规模作为通信需求的代理变量。对于任意地面站 g_k , 其热度 $H_{\text{base}}(g_k)$ 不仅取决于其所在城市的人口, 还通过中继机制聚合周边未被卫星覆盖区域的潜在需求, 如下所示:

$$H_{\text{base}}(g) = P(g) + \sum_{u \in U_k} p(u), \quad (11)$$

其中: $P(\cdot)$ 表示对应城市的人口数量, U_k 是映射到地面站 g_k 进行中继接入的未覆盖城市集合。

在 t 时隙, 地面站基础流量热度通过 GSL 注入卫星网络 (Traffic Injection), 卫星 s_i 从地面获得的初始注入热度 $H_{\text{inj}}(s_i, t)$ 为所有与其建立连接的地面站热度之和, 如下所示:

$$H_{\text{inj}}(s_i, t) = \sum_{g_k \in V_i'} H_{\text{base}}(g_k). \quad (12)$$

为反映流量的传播特性, 构建基于跳数衰减的热度扩散模型 (Demand Diffusion)。定义 t 时隙构建的全连接 ISL 拓扑 $G_{\text{ISL}}(t) = (S, E_t)$, 流量热度通过 ISL 在网络扩散, 卫星 s_i 的最终流量热度 $H_{\text{total}}(s_i, t)$ 由其自身的注入热度, 以及网络中所有其他卫星 s_j 扩散来的热度叠加而成。扩散强度随最短路径跳数呈指数衰减, 如下所示:

$$H_{\text{total}}(s_i, t) = H_{\text{inj}}(s_i, t) + \sum_{s_j \in S, j \neq i} (H_{\text{inj}}(s_j, t) \cdot \rho^{d_i(s_j, s_i)}), \quad (13)$$

其中: $d_i(s_j, s_i)$ 表示时隙 t 的 ISL 拓扑图中节点 s_j 到 s_i 的最短路径跳数, ρ 为热度衰减因子, 反映了业务流量在星间多跳中继时的衰减程度。

进一步定义星间链路 $l_{ij} = (s_i, s_j)$ 的链路热度 $H_{\text{link}}(l_{ij}, t)$ 为 ISL 两端卫星节点热度叠加, 如下所示:

$$H_{\text{link}}(l_{ij}, t) = H_{\text{total}}(s_i, t) + H_{\text{total}}(s_j, t), \quad (14)$$

反映 ISL 的潜在负载水平。

为识别低效 ISL, 设定低流量阈值 τ_{low} 为当前时隙 t 所有链路热度分布 P_{th} 百分位数值, 满足以下条件的卫星被标记为候选休眠节点:

$$S_{\text{idle}}(t) = \{s_i \in S \mid \forall l_{ij} \in E_t(s_i), H_{\text{link}}(l_{ij}, t) \leq \tau_{\text{low}}\}. \quad (15)$$

3.3 ISL 拓扑构建层

针对全连接星间链路拓扑 (Full Mesh ISL Topology) 能效低下、传统方法难以兼顾连通性与稳定性的问题, 本文提出一种基于 A2C 的骨干网络智能增强策略。该策略将拓扑构建解耦为骨干网络 (Backbone Network) 搭建与动态增强拓扑 (Enhanced Dynamic Topology) 生成两个子问题, 通过 A2C 算法实现动态优化。

3.3.1 混合拓扑架构设计

为压缩动作空间并保障核心业务服务质量,

本文提出混合拓扑机制:利用流量热度扩散模型识别全网高负载节点对,构建强制激活的骨干链路,形成承载核心流量的确定性子图。其余链路构成候选集合,交由A2C智能体根据实时网络状态进行概率性激活,以最小化能耗代价提升拓扑连通性与稳定性。

3.3.2 A2C状态与动作空间设计

本文将上述动态增强过程建模为MDP,由元组 $\langle S_{\text{ISL}}, A_{\text{ISL}}, R_{\text{ISL}}, \gamma_{\text{ISL}} \rangle$ 定义,以下为ISL层关键参数设计:

(1)状态空间 S_{ISL} :为了捕捉网络拓扑的时空演进特征并有效引导智能体满足连通性约束,本文将ISL构建任务建模为基于图的决策过程。定义全网潜在的候选星间链路集合为 E_{all} ,其数目为 $N_{\text{cand}}=|E_{\text{all}}|$ 。在 t 时隙,状态向量 $s_{\text{ISL}}(t)$ 定义为以下3个特征向量的级联,如下所示:

$$s_{\text{ISL}}(t)=[I_{\text{hist}}(t), M(t), C_{\text{deg}}(t)]. \quad (16)$$

历史链路状态矩阵 $I_{\text{hist}}(t)$:包含过去 L 个时隙的 N_{cand} 条候选链路的激活状态,使智能体能够感知链路的稳定性趋势;骨干网络指示掩码 $M(t)$:标识该链路是否属于不可操作的固定骨干,确保核心网络的稳定性;节点度数标识 $C_{\text{deg}}(t)$:指示每条链路两端卫星当前是否满足最小连接链路约束,引导智能体关注需要补充链路的卫星节点。

(2)动作空间 A_{ISL} :为处理离散且受限的拓扑组合优化问题,智能体输出连续的评分向量 $a_{\text{ISL}}(t) \in \mathbf{R}^{\text{Nedge}}$,代表各候选链路的激活优先级。采用贪婪策略优先激活能有效缓解度数不足的ISL,直至所有卫星满足最小连接度约束。

(3)奖励函数 R_{ISL} :为引导策略向链路稀疏、稳定且全连通的方向收敛,设计如式(17)的联合奖励函数 $R_{\text{ISL}}(t)$:

$$R_{\text{ISL}}(t)=-\omega_{\text{deg}} \sum_{i=1}^{N_{\text{sa}}} \max\left(0, D_{\text{min}} - \sum_{j \neq i} y_{i,j}(t)\right) - \omega_{\text{sp}} \sum_{i < j} y_{i,j}(t) - \omega_{\text{HO}} \sum_{i < j} |y_{i,j}(t) - y_{i,j}(t-1)|, \quad (17)$$

其中: $\omega_{\text{deg}} \max(0, D_{\text{min}} - \sum y_{i,j}(t))$ 表示对违反最小度数约束的卫星数目施加惩罚,确立全网络连通性的最高优先级; $\omega_{\text{sp}} y_{i,j}(t)$ 表示对活跃链

路总数施加线性惩罚,鼓励智能体在满足连通性的前提下构建最小生成拓扑,提升网络能效; $\omega_{\text{HO}} |y_{i,j}(t) - y_{i,j}(t-1)|$ 定义为当前拓扑与上一时隙拓扑的汉明距离,用于惩罚链路切换,提升网络稳定性。

4 仿真实验与结果分析

本章基于一个完整的卫星轨道周期,从通信阻塞率、平均跳数与网络服务质量(Quality of Service, QoS)受限下的网络容量及归一化能效等维度,系统验证所提分层协同架构的性能优势,重点揭示馈电资源受限条件下GSL高效接入与ISL拓扑能效之间的权衡关系。

4.1 仿真设置

本文基于Python与NetworkX库搭建卫星网络仿真平台,采用Walker Delta星座(22轨道 \times 22卫星,共484颗),星座轨道高度为600 km、倾角为 55° ,运行周期约为96 min。

4.1.1 基于快照的时变拓扑构建

为应对高动态性,将时间离散化为60 s的静态快照。每颗卫星配备4条10 Gbps激光ISL(2异轨+2同轨)及2条微波馈电GSL,星地信道容量基于实时链路预算动态计算。地面段选取全球人口前100的城市部署地面站,并引入地面中继机制,允许未覆盖站点通过光纤接入距离最近活跃信关站。

4.1.2 距离加权的 K -最短路径路由

针对时延敏感性,采用以物理距离为优化目标的 K -最短路径路由($K=3$),以平衡计算复杂度和寻路多样性。对每个业务请求,在当前拓扑快照中搜索物理距离最短的 K 条候选路径,优先选择满足链路剩余带宽约束 $\min_{e \in p}(b_e^{\text{res}}) \geq b^{\text{res}}$ 的路径;若均不可用,则判定业务阻塞。

4.1.3 最大网络容量

仿真统计业务阻塞率、平均端到端距离与平均跳数。为评估网络最大承载能力,设计迭代式压力测试:引入流量倍增因子 β ,定义阻塞率达阈值 τ_{block} 时的最大承载带宽为网络容量极限。网络容量与当前ISL数目之比即为网络能效。

上述仿真参数的具体设置如表1所示。

表1 通信仿真参数

Parameters	Value
Simulation scene duration T	96 min
Snapshot duration Δt	60 s
Satellite altitude h_s	600 km
Orbital planes inclination inc	55°
Minimum elevation θ_{ele}	7°
ISL bandwidth B_{ISL}	10 Gbps
GSL satellite EIRP $P_{S,Sat}$	36 dBW
GSL ground Station EIRP $P_{S,GS}$	45 dBW
Satellite antenna gain G_r	31 dBi
Ground station antenna gain $G_{s,g}$	37 dBi
GSL carrier frequency f_c	20 GHz
GSL uplink bandwidth $B_{GSL,up}$	50 MHz
Rain attenuation G_{rain}	1
GSL downlink bandwidth $B_{GSL,down}$	200 MHz
Connection requests	10,000
Bandwidth demand bw	[1,20] Mbps
Bandwidth multiplication factor β	1.05
Blocking rate threshold τ_{block}	30%

4.2 模型训练

为提高分层强化学习框架在动态环境下的训练稳定性,GSL接入层与ISL拓扑层均采用线性学习率退火、奖励归一化和熵正则化机制,分别用于平衡探索与利用、消除异构目标量纲差异,并抑制策略过早收敛。具体训练参数见表2和表3。

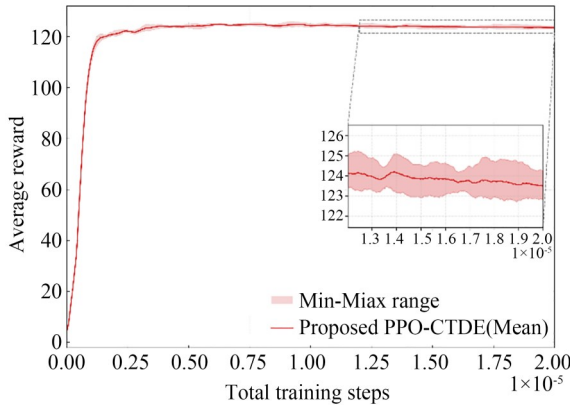
表2 MAPPO-CTDE 训练参数

Parameters	Value
Optimizer	Adam
Train step N_{step}	2×10^5
Actor learning rate α_{actor}	8.5×10^{-5}
Critic learning rate α_{critic}	8.5×10^{-5}
Population reward w_{pop}	50
Distance penalty w_{dist}	40
Max connections N_{max}	2
Handover penalty $w_{HO,GSL}$	10

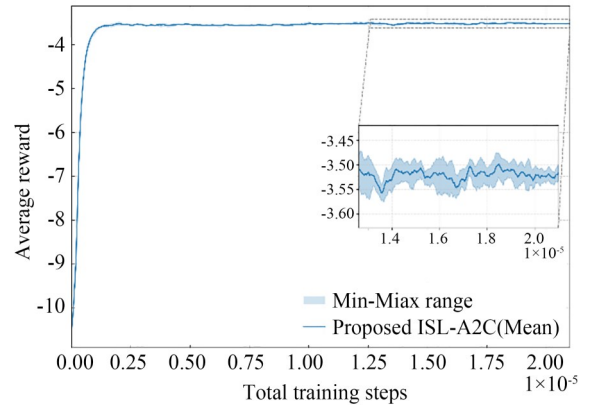
表3 A2C 训练参数设置

Parameters	Value
Optimizer	Adam
Train step N_{step}	2×10^5
Learning rate α	1×10^{-4}
History window length L	5
Degree penalty w_{deg}	50.0
Handover penalty $w_{HO,ISL}$	0.2
Sparsity penalty w_{sp}	0.05
Reward scale σ_r	1×10^3

两层优化方法的训练曲线如图4所示。图4(a)为GSL层训练曲线,图4(b)为ISL层训练曲线,两条曲线均表现出显著的快速学习且平稳收敛,且选取3种随机种子进行重复实验,生成的方



(a) MAPPO-GSL训练曲线
(a) MAPPO-GSL training curve



(b) A2C-ISL训练曲线
(b) A2C-ISL training curve

图4 分层强化学习训练曲线

Fig. 4 Training curves of hierarchical reinforcement learning framework

差阴影带极窄,表明该框架对随机初始化具有高度稳定性。

4.3 性能指标验证

本书通过多维度数据分析,验证所提星地链路优化策略(MAPPO-Opt)与星间优化拓扑(A2C Optimized Topology)构建联合架构的有效性。首先,分析星地链路的供需匹配特征,揭示传统策略的局限性;随后,从网络系统层面,对比不同接入策略与拓扑控制组合的通信性能与资源效率;最后,与现有ISL优化方法进行比较,证明本架构有效性。

4.3.1 GSL特征分析

为评估所提算法的GSL接入性能,选取3种典型的启发式策略作为对比基准。

(1)距离优先策略(Min-Distance):旨在最小化星地传输距离以降低路径损耗和时延。引入粘性机制:优先保持上一时隙已建且仍可见的连接;若有剩余接入能力,则从当前可见地面站中选择距离最近者建立新连接。

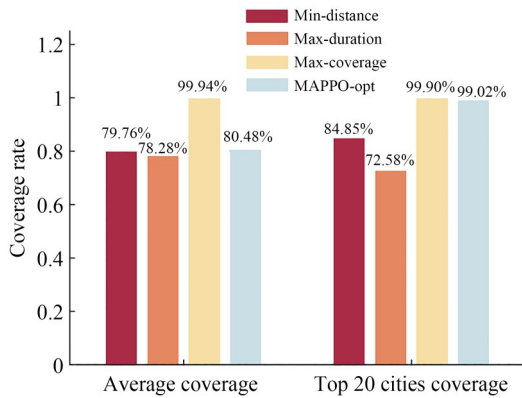
(2)服务时长优先策略(Max-Duration):针对

高动态引起的频繁切换问题,以最大化链路持续时间为目标。同样采用粘性机制保持现有连接;空闲时选择剩余可见时间最长地面站,以提升拓扑稳定性。

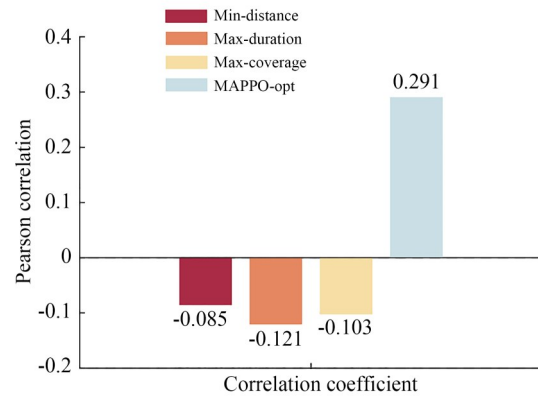
(3)覆盖优先策略(Max-Coverage):以最大化全球覆盖为首要目标。首先遍历未服务地面站,调度可视范围内有闲置资源的卫星进行覆盖;在满足最大化覆盖后,利用剩余馈电端口建立长时效连接,以提升系统吞吐量饱和度。

基准GSL接入选择方法与本文提出方法在城市覆盖率、人口相关性对比如图5所示。

如图5(a)所示,覆盖优先策略基本实现全网覆盖,但会牺牲链路质量和边缘节点服务。MAPPO优化策略的全网平均覆盖率为80.48%,略低于覆盖优先策略,但在人口前20的热点城市覆盖率达到99.02%。图5(b)显示,仅MAPPO策略的链路数目与人口分布呈正相关,说明其能够感知业务空间非均匀性,并将有限星载波束资源优先分配至高流量需求区域。



(a) 平均城市覆盖率
(a) Average city coverage rate



(b) GSL数与城市人口数相关系数
(b) Correlation coefficient between GSL count and city population

图5 四种GSL接入策略的覆盖率与资源倾斜对比

Fig. 5 Comparison of coverage and resource allocation across four GSL access methods

表4给出了4种策略下已建GSL的平均距离和持续时间。距离优先和服务时长优先策略分别在单一指标上最优;覆盖优先策略覆盖范围广,但平均链路距离最长、持续时间最短,说明其链路质量和稳定性较弱。MAPPO策略的平均链路距离为1 525.3 km,平均持续时间为

4.87 min,处于各基准策略之间。

上述结果表明,MAPPO策略并非单一追求覆盖率、最短距离或最长持续时间,而是在馈电终端受限条件下综合考虑业务需求、链路质量和连接稳定性。由于奖励函数中引入人口权重、星地距离和切换惩罚,智能体能够将有限GSL资源

表4 4种GSL接入策略物理属性

Tab. 4 GSL physical attributes under four access methods

	Mean GSL distance/km	Mean GSL duration /min
Min-Distance	1 400. 6	5. 54
Max-Duration	1 432. 5	6. 58
Max-Coverage	1 541. 1	3. 70
MAPPO-Opt	1 525. 3	4. 87

优先分配至高业务需求区域。因此,尽管其平均覆盖率不是最高,但热点城市覆盖率和人口相关性明显优于启发式方法,说明该策略具备业务感知能力。

4.3.2 通信性能与资源效率对比

为验证所提策略在网络层面的综合优势,本节从服务质量、路由拓扑特性及资源利用效能3个维度进行网络性能对比。首先,采用4种GSL

接入策略计算每时段连接状态;随后,利用热度扩散方法对星座节点的流量负载进行预估,识别每时段低效卫星节点;最后,驱动A2C智能体根据负载分布对ISL进行构建。作为对比,维持所有链路的全连接拓扑(Full Mesh Topology),其平均活跃ISL数量固定为968条;而经过智能体筛选的A2C优化拓扑,其平均活跃ISL对应每种GSL接入方法分别降低至654.11,657.63,664.46及657.27条。基于此架构,展开如下通信性能与资源效率对比评估。

图6(a)、6(b)分析了GSL接入策略对网络服务能力的影响。其中,MAPPO优化策略在两种ISL拓扑下均表现出最优性能:在A2C优化拓扑中,其阻塞率低至1.33%,QoS受限网络容量达310.44 Gbps;其余方法缺乏流量热度感知,易导致核心链路拥塞,因此阻塞率和容量均劣于所提方法,证实了MAPPO算法可有效识别流量时

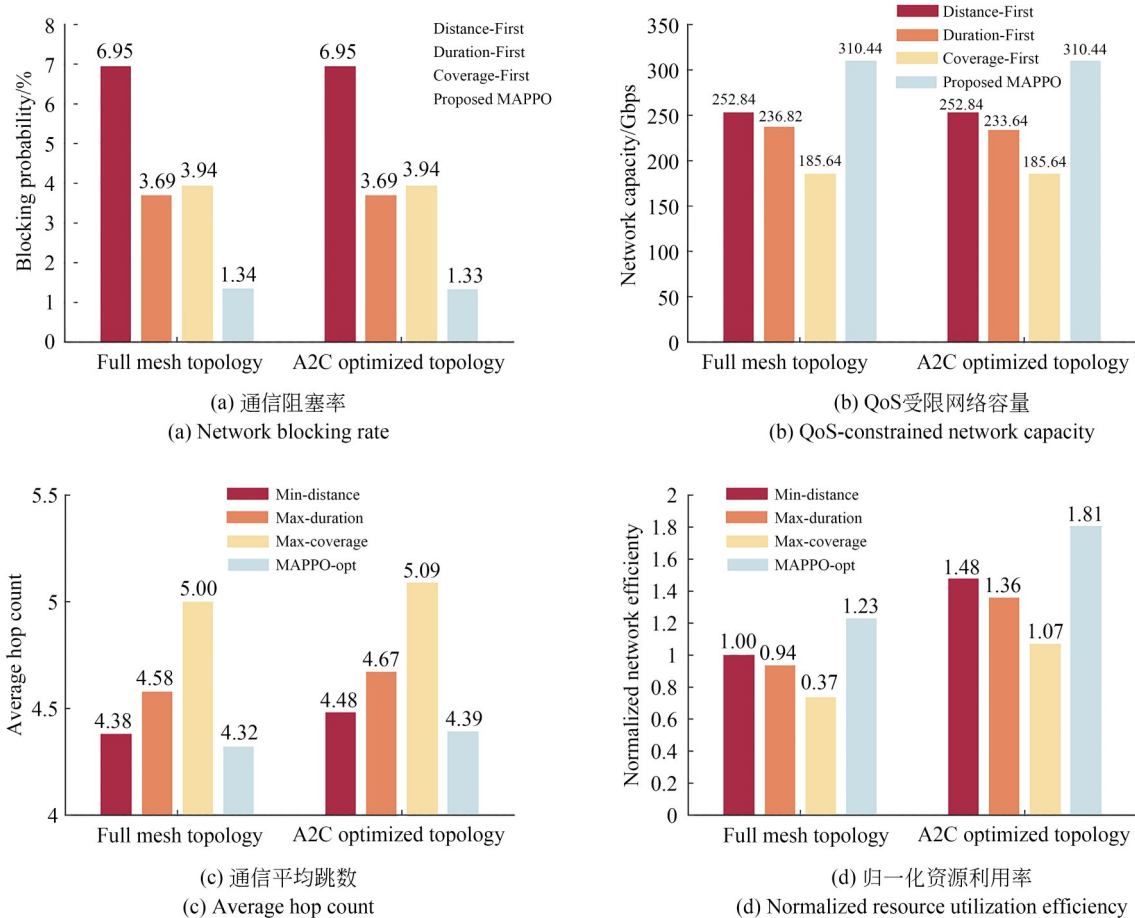


图6 不同拓扑结构与接入策略下的通信性能与资源效率对比

Fig. 6 Comparison of communication performance and resource efficiency under different topologies and access methods

空分布特征,通过资源主动倾斜实现全网负载均衡。此外,A2C优化拓扑相较全连接基准,在平均缩减32%ISL数量的基础上,阻塞率与网络容量无明显劣化,验证了该方法对低效冗余链路的精准裁剪能力。

图6(c)展示了业务平均跳数,可直接反映拓扑连通效率。其中,覆盖优先策略因过度追求边缘盲区覆盖,导致数据包被迫绕行,平均跳数达5.0跳;MAPPO优化策略平均跳数为4.32跳,略低于距离优先策略的4.38跳,说明其在负载优化的同时未显著增加端到端传输距离。经A2C拓扑优化后,各策略的平均跳数仅出现微幅上升,表明优化构建的稀疏拓扑并未因链路缩减而显著破坏网络连通性。

图6(d)给出了归一化能效的比较结果,其中归一化网络能效定义为当前策略能效与基准策略(距离优先GSL接入+全连接ISL网络)能效的比值,反映拓扑稀疏化与接入智能化带来的系统级能效增益。经A2C拓扑优化后,网络效率提升至基准方法的1.81倍。MAPPO-GSL接入与A2C-ISL拓扑构建的组合在保持低阻塞率和低时延的同时,提高了单链路资源利用率。

A2C优化拓扑在减少约32%的活跃ISL的情况下未明显降低网络容量,主要原因在于热度扩散机制能够识别低负载冗余链路,使智能体优先保留承载热点业务的关键链路。与此同时,最小度数约束和骨干链路保留机制保证了基本连通性,切换惩罚抑制了频繁重构。因此,拓扑稀疏化主要降低了无效能耗,而未显著破坏端到端路由能力。

所提方法的性能提升并非无代价的优化。首先,在GSL接入层,MAPPO策略并不以全局平均覆盖率最大化为唯一目标,而是在馈电终端受限条件下优先服务人口密集、高业务需求区域。因此,其平均链路距离和平均链路可用时长略低于传统链路接入策略,但热点城市覆盖率显著提高。其次,在ISL拓拓扑层,A2C策略通过关闭低热度冗余链路提升能效,但稀疏化拓扑相比于全连接网络会导致平均跳数轻微增加,并引入一定链路切换开销。因此,本文方法更适用于能耗受限、业务热点明显且允许一定拓扑自适应调整的天地一体化网络场景。

4.3.3 ISL拓扑指标对比实验

为了验证所提A2C优化拓扑性能,本节将其与领域内前沿的基于引力模型的流量链路开关控制(Gravity-based ON/OFF Control, GOOC)方法进行对比^[29]。GOOC通过计算链路潜在工作负载权重来决定链路的通断。对比实验中,所有方法的星地层统一采用本文提出的MAPPO最优策略。

对比实验选取了GOOC算法在2 000 km, 3 000 km及4 000 km 3种抽象半径(Abstraction Radius, AR),并测试了10%和20%两种链路关闭比例。本文提出的A2C方法则根据智能体的实时决策动态调整链路状态,其平均链路关闭比例为32.1%,对比结果如表5所示。

在相近的节能水平下,A2C方法展现出更优的综合性能。由表5可知,A2C优化拓扑在关闭32.1%的ISL情况下,系统阻塞率低至1.33%,平均跳数为4.39跳,每时隙链路切换比例为

表5 A2C与GOOC拓扑优化结果对比

Tab. 5 Performance comparison of A2C and GOOC topology optimization

Method	ISL shut-down ratio	Average active links/Slot	Blocking rate	Average hop count	Link handover ratio/Slot	QoS-Constrained network capacity/Gbps	Normalized network efficiency
A2C Optimized Topology	32.1%	657.27	1.33%	4.39	1.22%	310.44	1.81
GOOC-2000	10%	872	1.49%	4.51	1.32%	294.48	1.29
	20%	775	1.49%	4.59	3.28%	288.06	1.42
GOOC-3000	10%	872	1.34%	4.38	2.76%	307.26	1.35
	20%	775	2.35%	4.73	4.93%	252.84	1.25
GOOC-4000	10%	872	1.46%	4.47	3.21%	300.84	1.32
	20%	775	1.79%	4.61	1.27%	284.88	1.41

1.22%, QoS受限网络容量达到310.44 Gbps, 归一化网络效率达到1.81, 显著高于GOOC的最优值1.42。其原因在于, GOOC依赖固定抽象半径和预设关闭比例, 难以适应业务热点迁移和拓扑时变特征; 而A2C能够结合链路热度、历史状态和节点度数约束进行自适应决策, 选择性关闭低效冗余链路并保留关键路径。因此, A2C在更高链路关闭比例下仍能维持较低阻塞率和较小切换开销, 体现出更好的动态适应性与拓扑稳定性。

5 结 论

针对天地一体化信息网络中存在的卫星馈电资源受限与地面业务时空分布不均的问题, 本文提出了一种基于分层协同架构的天地一体化动态链路管理策略。该策略将高维全网联合优化问题解耦为流量感知的星地接入与能效优先

的拓扑重构, 构建GSL接入层、流量估计耦合层和ISL拓扑层的三层优化框架。GSL层的MAP-PO-CTDE接入机制能够精准响应地面热点分布, 保障服务连续性; ISL层的A2C拓扑控制策略则基于自底向上的流量反馈, 平衡网络能耗效率与整体连通性。仿真实验表明, 系统在仅引入1.22%链路切换开销的前提下, 实现了1.33%的低阻塞率与310.44 Gbps的网络容量; 相较于全连接基准, ISL能耗降低32%, 归一化资源效率提升至1.81倍, 实现了服务质量与能耗效率的同步提升。

作者贡献声明:

王浩楠: 方法设计, 论文构思与撰写;
彭攀: 实验设计及数据整理和分析;
郁宏伟: 项目管理与论文指导;
万松: 论文指导与审核;
陶卫: 提供资源及论文审核。

参考文献:

- [1] WANG H, BI Y X, YAN F L, *et al.* Multi-beam satellite optical networks: a joint time-slot resource scheduling for end-to-end services from a networking perspective[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2025, 22(1): 426-438.
- [2] NING Y X, YI L T, ZHAO Y L, *et al.* Load-balancing routing algorithms for service congestion avoidance in LEO optical satellite networks [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2023, 15(12): 1038-1049.
- [3] JING Y J, YI L T, ZHAO Y L, *et al.* Deep-learning-based path computation without routing convergence in optical satellite networks [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2023, 15(5): 294-303.
- [4] WANG C, ZHANG P Y, KUMAR N, *et al.* GC-WCN: 6G-based global coverage wireless communication network architecture [J]. *IEEE Network*, 2023, 37(3): 218-223.
- [5] LAI J Y, LIU H S, XU G Y, *et al.* Joint computation offloading and resource allocation for LEO satellite networks using hierarchical multi-agent reinforcement learning [J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2025, 11(4): 2554-2567.
- [6] XIAO Y, YE Z Q, WU M M, *et al.* Space-air-ground integrated wireless networks for 6G: basics, key technologies, and future trends [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2024, 42(12): 3327-3354.
- [7] DENG R Q, DI B Y, ZHANG H L, *et al.* Ultra-dense LEO satellite constellations: how many LEO satellites do we need? [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(8): 4843-4857.
- [8] 武艳, 潘广川, 姚明昨, 等. 基于深度强化学习的空天地一体化网络信息物理系统垂直切换策略 [J]. *通信学报*, 2024, 45(8): 180-191.
WU Y, PAN G CH, YAO M W, *et al.* Vertical handover policy for cyber-physical systems aided by SAGIN based on deep reinforcement learning [J]. *Journal on Communications*, 2024, 45(8): 180-191. (in Chinese)
- [9] CANTORE C, MONOPOLI D, ALTAMURA A, *et al.* Link budget analysis of bi-directional LEO and GEO optical feeder links advancing the beam wander model's accuracy [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 8579.
- [10] 谢健骊, 陈龙, 张泽鹏, 等. 基于位置预测模型的

- 空天地一体化网络切换算法[J]. 通信学报, 2024, 45(12): 162-178.
- XIE J L, CHEN L, ZHANG Z P, *et al.* Handover algorithm for space-air-ground integrated network based on location prediction model[J]. *Journal on Communications*, 2024, 45(12): 162-178. (in Chinese)
- [11] ZOU Y S, KE Z H, SHAO Y D, *et al.* Short-distance equivalent test of acquisition, pointing, and tracking process for space laser communication[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(3): 721.
- [12] 王宜州, 翟政豪, 王元祥, 等. 空天地一体化光通信网络: 现状、挑战与未来发展趋势[J]. 光学学报, 2025, 45(13): 286-300.
- WANG Y ZH, ZHAI ZH H, WANG Y X, *et al.* Integrated space-air-ground optical communication networks: status, challenges, and future development trends [J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(13): 286-300. (in Chinese)
- [13] 李贺武, 刘李鑫, 刘君, 等. 基于位置的天地一体化网络路由寻址机制研究[J]. 通信学报, 2020, 41(8): 120-129.
- LI H W, LIU L X, LIU J, *et al.* Location based routing addressing mechanism of integrated satellite and terrestrial network[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(8): 120-129. (in Chinese)
- [14] 常呈武, 刘宏阳. 卫星互联网星间激光通信链路传输与路由交换技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(7): 0706005.
- CHANG CH W, LIU H Y. Research on inter-satellite laser communication link transmission and routing switching technology of satellite Internet [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(7): 0706005. (in Chinese)
- [15] LAN W J, CHEN K Y, CAO J N, *et al.* Security-sensitive task offloading in integrated satellite-terrestrial networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2025, 24(3): 2220-2233.
- [16] SONG Y J, CAO Y, HOU Y Z, *et al.* A channel perceiving-based handover management in space-ground integrated information network [J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2024, 21(1): 882-896.
- [17] BELLO M, PILLAI P, SADIQ A S. An intelligent load balancing algorithm for 5G-satellite networks[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2024, 42(5): 329-353.
- [18] WANG W, ZHAO Y L, ZHANG Y J, *et al.* Intersatellite laser link planning for reliable topology design in optical satellite networks: a networking perspective [J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2022, 19(3): 2612-2624.
- [19] WANG G H, YANG F, SONG J, *et al.* Dynamic laser inter-satellite link scheduling based on federated reinforcement learning: an asynchronous hierarchical architecture [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(10): 14273-14288.
- [20] HUANG J F, YANG Y, LEE J, *et al.* Deep reinforcement learning-based resource allocation for RSMA in LEO satellite-terrestrial networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2024, 72(3): 1341-1354.
- [21] HASSAN S S, PARK Y M, TUN Y K, *et al.* SpaceRIS: LEO satellite coverage maximization in 6G sub-THz networks by MAPPO DRL and whale optimization [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2024, 42(5): 1262-1278.
- [22] YIN Z L, CHEN Q, YANG L, *et al.* Routing cost-integrated intelligent handover strategy for multi-layer LEO mega-constellation networks [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2025, 38(6): 103263.
- [23] HAN Z Z, XU C, ZHAO G F, *et al.* Time-varying topology model for dynamic routing in LEO satellite constellation networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(3): 3440-3454.
- [24] WRIGHT D, GREGO L, GRONLUND L. *The Physics of Space Security: A Reference Manual* [M]. UK: University of Cambridge, 2005.
- [25] HE X C, HUGENTOBLE U, SCHLICHT A, *et al.* Precise orbit determination for a large LEO constellation with inter-satellite links and the measurements from different ground networks: a simulation study [J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 22.
- [26] YI X D, CHIN K W, LI Z, *et al.* Free space optical links scheduling and routing in satellite networks: a safe reinforcement learning approach [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(14):

- 28712-28722.
- [27] GHARANJIK A, BHAVANI SHANKAR M R, ARAPOGLOU P D, *et al.* Multiple gateway transmit diversity in Q/V band feeder links [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(3): 916-926.
- [28] JUNG D H, RYU J G, BYUN W J, *et al.* Performance analysis of satellite communication system under the shadowed-rician fading: a stochastic geometry approach[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(4): 2707-2721.
- [29] WANG W, ZHANG Y J, ZHAO Y L, *et al.* Gravity-based network traffic abstraction and laser ON/OFF control in optical satellite networks [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2023, 15(12): 958-968.

作者简介:

王浩楠(2002—),男,辽宁大连人,硕士研究生,2024年于山东大学获得学士学位,主要从事星间激光通信方面的研究。E-mail: whnsjtu24@sjtu.edu.cn

通讯作者:

陶卫(1975—),女,辽宁大连人,博士,研究员,博士生导师,1997年、1999年、2003年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事光电及视觉检测技术方向的研究。E-mail: taowei@sjtu.edu.cn