



XXXX

低轨巨星座网络路由技术综述与展望

于泓源^{1,2}, 张贤^{1,2}, 周家恩³, 李学华^{1,2}

- (1. 北京信息科技大学信息与通信工程学院 北京 102206;
2. 北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室 北京 102206;
3. 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室 北京 100876)

摘 要: 随着卫星互联网业务量的快速增长与卫星发射成本的持续降低, 低地球轨道卫星网络部署呈现巨型化与智能化趋势。传统地面网络与小规模星座网络路由技术通常基于静态或准静态拓扑, 难以应对低轨巨星座网络拓扑高动态时变导致的信令泛洪与路由收敛滞后挑战。针对上述问题, 首先从面向不同业务类型的角度对低轨巨星座路由技术进行了分类与最新研究进展综述; 然后对比分析了三种低轨巨星座网络路由管控架构, 同时针对星载资源受限与智能路由模型协同训练难度大的挑战, 介绍了一种基于分布式云构建的分层分布式路由管控架构与智能路由方法; 接着总结了ITU、3GPP、IEEE与IETF等标准化组织围绕卫星网络路由技术的相关标准化工作, 并从软件仿真、半实物仿真及在轨验证三个方面综述了相关仿真验证。最后从跨域协同路由、天基算力路由与巨星座可信路由三个方面对低轨巨星座网络路由技术进行了展望, 以期低轨巨星座网络路由技术的理论研究与实际部署提供参考。

关键词: 低轨卫星通信; 巨星座; 卫星网络路由; 分层分布式架构; 智能路由

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.

Overview and outlook on routing technologies in LEO mega-constellation networks

YU Hongyuan^{1,2}, ZHANG Xian^{1,2}, ZHOU Jiaen³, LI Xuehua^{1,2}

1. School of Information and Communication Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 102206, China
2. Key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 102206, China
3. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: With the rapid growth of satellite internet traffic and the continuous decline in satellite launch costs, the de-

收稿日期: 2026-04-22; 修回日期: 2026-08-20

通信作者: 张贤, zhangxian@bistu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62401066);

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62401066);



ployment of low Earth orbit (LEO) satellite networks is trending toward mega-constellations and intelligent systems. Traditional ground-based network and small-scale constellation routing technologies are typically based on static or quasi-static topologies, making it difficult to address the challenges of signaling flooding and routing convergence delays caused by the highly dynamic, time-varying topologies of LEO mega-constellations. To address these issues, this paper first classifies LEO mega-constellation routing technologies according to different service types and reviews the latest research progress. It then conducts a comparative analysis of three routing control architectures for LEO mega-constellation networks. Furthermore, to address the challenges posed by limited on-board resources and the difficulty of collaborative training for intelligent routing models, the paper introduces a hierarchical, distributed, intelligent routing control architecture and routing method based on a distributed cloud. Next, this paper summarizes the standardization efforts of organizations such as ITU, 3GPP, IEEE, and IETF regarding satellite network routing technologies, and reviews relevant simulation and verification work from three aspects: software simulation, hardware-in-the-loop simulation, and in-orbit verification. Finally, the paper explores the development trends and technical challenges of LEO mega-constellation network routing technology from three perspectives: cross-domain collaborative routing, space-based computing power routing, and trusted routing for mega-constellations, with the aim of providing a reference for both theoretical research and practical deployment of LEO mega-constellation network routing technology.

Key words: LEO satellite communications, Mega-constellations, Satellite network routing, Hierarchical distributed architecture, Smart Routing

1 引言

低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星通信网络因具有低时延, 广域覆盖及高可靠的特点, 被视为第六代移动通信系统 (The Sixth Generation Mobile Communication System, 6G) 的关键组成, 亦是当前学术界与产业界的研究热点^{[1][3][3]}。2026年3月, 国家“十五五”规划纲要中明确提出推动6G等成为未来新的经济增长点^[4]。随着卫星批量化与模块化制造、可重复使用火箭与“一箭多星”等技术的发展与成熟, 显著降低了LEO卫星发射成本, 推动了LEO卫星网络向巨星座发展^[5]。在轨道与频谱“先占先得”机制下, 各国加速布局, 已形成以中国“GW”星座、“千帆”星座, 美国Starlink、Kuiper与Iridium, 英国的OneWeb, 加拿大Telesat等为代表的巨星座系统^[6]。

根据轨道高度的差异, 人造卫星通常划分为LEO卫星、中地球轨道 (Middle Earth Orbit, MEO) 卫星、地球静止轨道 (Geostationary

Earth Orbit, GEO) 卫星^[7]。与传统单层或小规模LEO卫星网络不同, 低轨巨星座网络不局限于单层轨道部署, 而是向集成LEO卫星等多层轨道卫星网络、地面网络与空基网络的多层跨域异构组网演进, 呈现出节点数量庞大、多层跨域异构与拓扑高动态变化的显著特征^[8]; 同时考虑到单星计算、存储、带宽和功耗受限, 面向差异化业务需求, 巨星座网络路由已不仅限于“选条路”, 它决定了星座的可服务带宽上限、业务时延下限和抗毁生存能力, 是巨星座网络从“能通”到“好用”的关键技术之一^[9]。

当前, 学术界和产业界围绕低轨巨星座网络路由技术开展了一系列研究, 主要集中在路由管控架构与协议设计、路由优化方法及跨域网络融合与互操作等方面^[10]。在路由管控架构方面, 相关研究借助软件定义网络 (software-defined networking, SDN) 控制与转发分离、分层分布式混合决策以及SRv6与SDN融合机制等, 提升星载资源编排与路由管控能力^{[11][12]}; 在路由优化方面, 针对非均匀流量分布与星间链路 (Inter-

Satellite Link, ISL) 频繁切换的问题, 当前研究设计了各类自适应与智能路由算法^[8]; 在跨域融合方面, 文献[13]将SDN与多边缘协同引入巨星座路由, 提出分层控制架构实现跨域异构卫星网络与地面核心网的统一编排。然而, 面向巨星座网络的规模化部署需求, 巨星座网络路由技术仍面临诸多挑战, 比如路由收敛滞后、跨域协同难度大、安全可信机制不足及技术兼容性不足等挑战^{[14][15]}。

现有相关综述主要从业务分发模式、网络拓扑结构、路由优化指标、空间段架构组成及典型协议机制等角度, 对巨星座网络路由技术进行了归纳与总结。例如, 文献[14]从业务为核心与拓扑为核心两个角度综述了星上路由技术; 文献[16]围绕信令开销、负载均衡、故障处理和服务质量(Quality of Service, QoS)保障等能力需求对巨星座路由算法进行了分类; 文献[17]从网络拓扑管理、时延优化及网络的高弹性与可靠性角度出发, 总结了巨星座网络路由算法; 文献[18]依据空间段架构组成, 将路由技术划分为单层卫星网络路由技术与多层卫星网络路由技术; 文献[19]系统梳理了虚拟节点路由与分段路由(Segment Routing, SR)等低轨巨星座网络路由机制。现有综述缺乏对差异化业务与路由算法的适配关系、路由管控架构与标准化, 以及巨星座网络路由技术仿真验证等方面的系统梳理。

基于上述不足, 本文首先从面向差异化业务的角度, 将路由技术划分为面向时延容忍业务的路由技术、面向时延敏感业务的路由技术以及面向非时延容忍与敏感业务的路由技术三类; 然后对比分析了典型的路由管控架构, 重点介绍了一种基于分布式云构建的智能路由管控架构与方法, 并梳理了巨星座网络路由技术相关的标准化进展; 接着, 概述了卫星网络路由技术仿真验证方法与平台; 最后, 围绕跨域协同路由、天基算力路由与巨星座可信路由探讨了巨星座网络路由

技术的开放性问题与挑战。

2 低轨巨星座网络路由技术

针对低轨巨星座路由技术的分类方法, 当前主要包括面向不同性能指标优化的分类方法、面向不同业务类型的分类方法、基于不同路由管控架构的分类方法和基于虚拟节点/虚拟拓扑的分类方法等。其中面向不同性能指标优化的分类方法通常侧重单一性能优化目标; 面向不同业务类型的分类方法根据业务类型, 考虑多种性能指标优化需求; 而基于不同路由管控架构的分类方法, 则依据巨星座网络的管控架构与决策方式进行分类; 基于虚拟节点/虚拟拓扑的分类方法, 主要以化动为静的思想解决拓扑高动态变化的问题。这些分类方法分别侧重路由性能优化、业务需求适配、决策方式及动态拓扑简化, 然而考虑到卫星节点高速移动, 时空信息的有效价值与其生存时间(Time to Live, TTL)呈指数级反比, 时延已成为衡量空间网络多维度QoS的重要目标, 将时延性能作为路由算法分类的准则能够更精细刻画网络对业务逻辑的承载能力; 此外, 受低轨巨星座网络拓扑高动态与链路间歇连接影响, 不同业务类型对拓扑感知和路径动态调整的需求差异显著, 且这一差异较地面网络更为突出。

对于大规模巨星座网络而言, 时延不仅是业务服务质量的重要指标, 也是影响路由算法设计、路由更新周期和网络控制开销的关键因素。因此, 本文以时延性能约束为主要分类依据, 将低轨巨星座网络路由技术分为三类: 面向时延容忍业务的路由技术、面向时延敏感业务的路由技术及面向非时延容忍与敏感业务的路由技术。特别地, 时延容忍业务通常考虑秒级、分钟级的链路中断甚至更长的时延容忍, 强调在强干扰或链路不稳定条件下的数据可达性与鲁棒性^[20]; 而在3GPP非地面网络(Non-Terrestrial Network, NTN)框架下, 时延敏感业务通常以150ms为端



到端时延约束硬指标, 更关注端到端时延的确定性与收敛性^[21]; 非时延容忍与敏感业务主要考虑吞吐量敏感业务与高可靠业务, 它们能够分别代表低轨巨星座网络在规模化商用服务和关键任务保障中的两类典型业务需求。此外, 在大规模巨星座部署背景下, 路由算法适用性不仅取决于端到端时延、丢包率和吞吐量等传统指标, 还需关注其规模扩展性, 包括路由表规模、控制信令开销及拓扑变化下的收敛时延等。

2.1 面向时延容忍业务的路由技术

为解决LEO卫星网络间歇连接下的数据可达性问题, Kevin Fall等于2004年提出时延容忍网络(Delay Tolerant Network, DTN), 并逐步应用于深空通信^{[22][23]}。DTN在应用层与传输层之间引入Bundle协议层, 如图1, 采用“存储-携带-转发”机制, 通过节点缓存与机会转发适应链路间歇通断, 可缓解ISL频繁切换导致的路径不稳定问题^[20]。

受限于巨星座网络拓扑高动态与链路复杂等特征, 传统DTN路由在大规模部署中易面临信令开销较大、收敛滞后与链路拥塞等问题。现有面向时延容忍业务的路由方法可归纳为两类。

第一类是拓扑先验的可扩展路由规划方法, 例如文献[24]通过区域划分与路由窗口表降低接触计划规模, 实现接近全局知识路由的区域转发性能; 文献[25]改进接触图路由(Contact Graph Routing, CGR)算法, 在满足TTL约束的路径中优先选择最小跳数路由, 以缓解异构业务下的中继拥塞; 文献[26]提出了一种基于等价距离与先验知识的转发策略(Equivalent Distance and Priori Knowledge-based Forwarding Strategy, EPFS)与虚拟确认算法(Virtual Acknowledgment Algorithm, VAA), 结合等效距离、队列状态与虚拟确认机制, 降低大规模多跳场景下的选路与重传开销。该类方法利用星历信息、接触计划或等效距离等先验知识降低全网拓扑维护开销, 提升巨星座路由可扩展性, 但对轨道预测和接触计划准确性依赖较强。

第二类是基于缓存状态的分布式自适应拥塞控制方法, 例如文献[26]提出一种基于紧急函数的捆绑丢弃算法(Emergency Function-based Bundle Drop Algorithm, EBDA), 基于优先级与TTL构建紧急函数, 在缓存受限时选择性丢弃低紧急度Bundle; 文献[27]提出一种分布式时延保

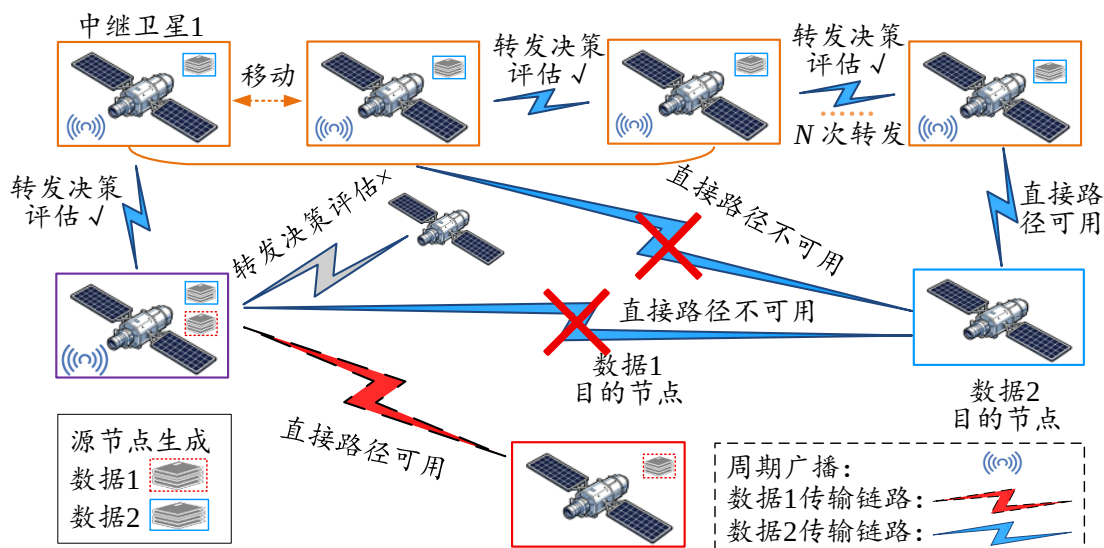


图1 Bundle协议层存储-携带-转发机制

证路由 (Delay-Guaranteed Routing, DGR), 通过优先级队列、逐跳时延上界和随机反压策略进行拥塞规避。该类方法增强了局部拥塞控制能力, 但受限于局部状态感知, 仍可能存在局部最优和路径振荡问题。

2.2 面向时延敏感业务的路由技术

随着远程医疗、自动驾驶等时延敏感业务增长, 巨星座网络需提供毫秒级端到端时延与高可靠服务保障, 但拓扑高动态、ISL 频繁切换及空间流量分布不均增加了确定性保障难度。LEO 卫星链路时延由传播时延、传输时延、处理时延、排队时延及多跳转发时延共同构成, 例如 600 km 轨道单向星地传播时延约为 2 ms, 因此路由优化重点在于降低星载处理与排队时延、多跳累积时延, 以提升端到端时延的确定性与稳定性。

针对确定性数据传输, 主要有时间敏感网络 (Time-Sensitive Network, TSN) 与时隙触发以太网 (Time-Triggered Ethernet, TTE) 两类技术架构。TTE 通过严格的时间触发机制实现低时延抖动, 但高度依赖静态调度表及专用硬件, 技术复杂度高, 且适用场景与互操作性受限^[28]。相比之下, TSN 作为标准化协议簇, 兼具灵活的流量调度能力与标准以太网兼容性, 异构网络互操作性更强; 其协议体系包含时钟同步、数据调度与流量整形、可靠性保障及资源管理, 可根据业务需求进行模块化组合与按需编排^[29]。其中, IEEE

802.1Qca 通过显式路径配置与资源预留突破生成树单路径限制; IEEE 802.1CB 采用帧复制与消除机制, 通过冗余传输提高传输可靠性。如图 2, 发送端复制数据帧并赋予唯一序列号, 由集中式控制器配置多条不相交路径 (如 A-D-G、C-E-H 等) 进行同步传输, 接收端 (如 F 节点) 依据序列号消除重复帧, 仅将首个到达帧交给上层应用。

根据优化方法差异, 可将面向时延敏感业务的路由技术归纳为流量调度、链路稳定性与拓扑高动态三类。在流量调度中, 文献[30]将星内及 ISL 流量调度建模为多商品流问题, 通过在线内点法动态调整链路负载, 以缓解高吞吐量场景下的拥塞时延, 但其理论调度模型与星载硬件队列机制仍存在一定失配, 极端拥塞下确定性时延保障能力受限。针对链路稳定性, 文献[31]基于链路距离与相对角速度筛选稳定 ISL 集合, 以拓扑持续时间最大化为目标构建跨网络连接; 文献[32]构建三坐标逻辑拓扑模型, 通过轴优先级指导数据包转发, 从而减少路由通告与表项维护开销。该类方法主要利用链路距离、相对角速度与逻辑坐标等拓扑先验信息提升路径稳定性, 但在巨星座大规模节点环境下, 仍需兼顾链路状态更新开销与突发流量下的路由弹性。针对巨星座拓扑高动态, 文献[33]基于树突神经网络 (Dendrite Neural Network, DNN) 感知卫星可视性与

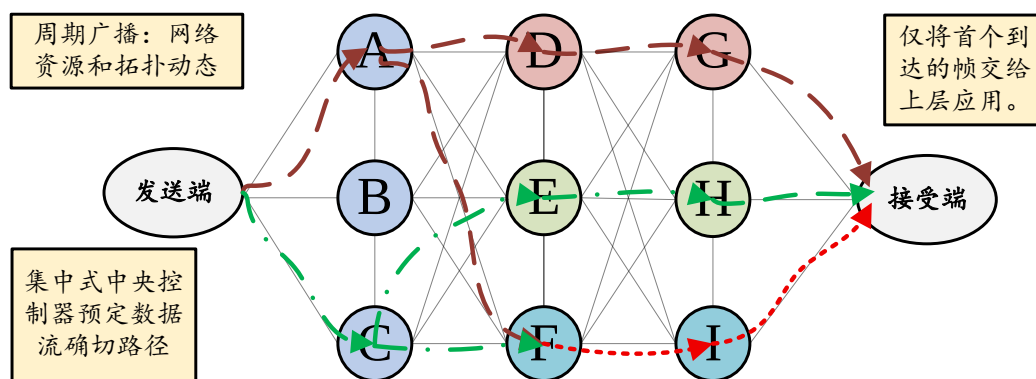


图2 TSN路由确定性传输



ISL 状态，并通过动态调整链路权重修正初始路由路径；文献[34]提出了一种新型受限多智能体强化学习动态路由算法（Constrained Multi-Agent Reinforcement Learning, CMADR），该算法在更新策略与拉格朗日乘子时，能够高效平衡目标改进与约束满足。如图3，每颗卫星和地面站形成各自的观测值，并将其传输至本地执行器与本地成本评估器；全局状态被发送至中央奖励评估器与中央成本评估器，以获取联合状态奖励值和成本值用于执行器网络训练，但该方法采用集中式训练框架，对全局状态信息的实时同步仍存在较高依赖。

由表1可见，面向时延容忍业务的路由技术侧重通过拓扑先验、缓存管理等保障数据可达；面向时延敏感业务的路由技术更关注端到端时延确定性，通过流量调度、智能决策等实现快速路径调整。面向大规模巨星座部署，两类方法均呈现出向降低全局状态依赖、分区化与局部化决策的演进趋势。

2.3 面向非时延容忍与敏感业务的路由技术

本文将面向非时延容忍与敏感业务路由技术分为面向吞吐量敏感业务的路由技术与面向高可

靠类业务的路由技术两类，这两类路由技术与算法主要面向时延性能介于时延容忍与时延敏感之间的业务类型，具体总结见表2。吞吐量敏感路由技术侧重通过多维资源的精细化调度以最大化网络吞吐量。例如文献[35]基于BIRD软件与开放式最短路径优先（Open Shortest Path First, OSPF）动态路由相结合的混合路由架构，支撑信关站侧大规模用户数据转发，但其路由维护仍依赖OSPF邻接关系和网管系统配置，巨星座场景下需进一步降低维护开销；文献[36]融合蚁群算法（Ant Colony Optimization, ACO）搜索能力与强化学习（Reinforcement Learning, RL）的反馈机制，利用链路质量反馈引导路由请求避开高负载节点，从而提升非均匀流量场景下的负载均衡能力，但在巨星座网络中仍面临收敛周期长和计算开销大的问题。

面向高可靠业务的路由技术侧重保障全局网络状态的可靠分发与路径稳定。文献[37]基于SDN架构与深度强化学习（Deep Reinforcement Learning, DRL）提出了一种名为IRIS的智能可靠路由方案，显著增强智能体在极端故障环境下的泛化与容错能力。文献[38]将卫星链路动态通断

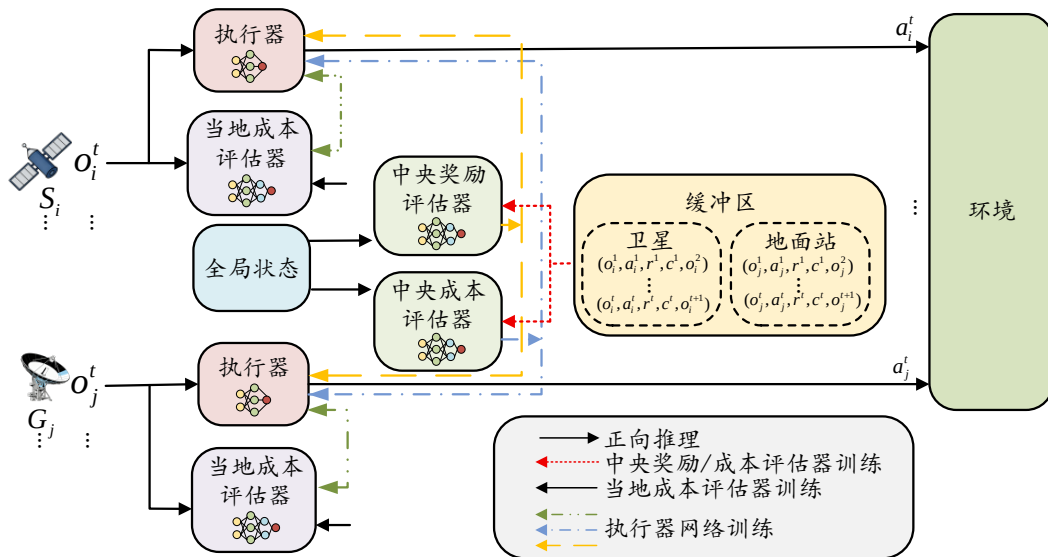


图3 CMADR算法框架图^[34]

表1 面向时延容忍业务与时延敏感业务的路由算法

面向业务类型	算法类型	算法名称	核心机制	复杂度分析
时延容忍业务	面向动态拓扑	基于区域网络近似最优路由算法 ^[24]	局部区域知识下实现近全局性能的可扩展跨区域路由。	附加搜索复杂度取决于通道节点对数量与每对通道路由窗口数，区域化限制单节点接触规模，有较好的大规模扩展性。
		CGR-Hops ^[25]	面向异构 TTL 业务增强 CGR 的拥塞规避与 QoS 适配能力。	随卫星节点数增加，接触图候选路径增多，万星规模需将接触图压缩或分区。
		EPFS VAA ^[26]	利用轨道可预测性降低转发状态依赖与多跳确认开销。	EPFS 无需存储全网拓扑，计算与存储开销受卫星节点数量影响较小；VAA 受卫星节点数量影响较大；多层异构拓扑下等效距离度量需重构。
	面向拥塞控制	EBDA ^[26]	基于业务紧急度的缓存拥塞差异化控制。	开销主要受本地缓存占用和拥塞强度影响。
		DGR ^[27]	无资源预留的分布式逐包时延保障与拥塞自适应。	转发表生成复杂度为 $O(kn \log n)$ ，转发表与链路状态随节点数增长，万星级部署需局部化执行。
	面向动态流量	在线凸优化 ^[30]	兼顾性能保证与星上实时性的轻量在线优化。	复杂度来源于优化问题变量数以及约束数。
时延敏感业务	面向 ISL	基于链路距离和角速度 ^[31]	兼顾低时延与链路稳定性的跨网格连接调度。	UCS 时间复杂度为 $O((V + E)\log V)$ ，其中 V 与 E 为图中节点数与链路数。
		三坐标优先轴 ^[32]	消除全局路由表依赖的轻量可扩展转发。	不维护全网路由表，逐包转发主要为坐标比较与本地链路状态，不随卫星节点数量变化。
	面向网络拓扑	智能感知路由算法 ^[33]	突破固定路径标签限制的多 QoS 实时感知路由。	复杂度低于传统神经网络，但训练集构造依赖 ACO 算法，扩展巨星座需考虑训练规模。
		CMADR ^[34]	多约束显式保障下的分布式智能路由决策。	训练开销高，扩展巨星座需控制训练规模与状态同步范围。

建模为马尔可夫过程，提出了基于链路生存时间预测的可靠稳定路由与传输算法（CSPF-LST），以及基于链路生存时间的动态加权最短路径算法（DWSP-LST），通过链路生存时间预测与动态权重机制提升路径可靠性。文献[39]提出了一种名为 HLLMR 的高可靠多径路由算法，实现了在严苛端到端时延约束下的超高数据传输成功率。面向巨星座场景，可结合轨道可预测性构建分区化时间切片图，提前规划主备路径并支持平滑切换，或引入局部自愈与区域协同机制，在降低全网状态同步开销的基础上提升节点失效条件下的可靠转发能力。

3 路由管控架构与标准化

3.1 路由管控架构

低轨巨星座网络路由管控架构主要包括集中式、分布式与混合式三类。表3对比了不同路由管控架构的优缺点、适用场景及典型案例，可以看出其适用性主要取决于网络规模、QoS 需求及星上资源约束等。随着卫星网络部署规模的持续增长，传统基于物理节点 IP 地址的静态路由由绑定难以适应低轨巨星座网络拓扑高动态特性，若路由标识与具体卫星节点强绑定，节点状态变化与 ISL 切换等均可能引发频繁路由表更新，进而带



表2 面向非时延容忍与敏感业务的路由算法

非时延容忍与敏感业务类型	算法名称	算法类型	核心机制	复杂度分析
吞吐量敏感业务	基于BIRD的混合路由方案 ^[35]	静态-动态混合路由	提升多网络段HTS用户接入下的路由连续性与工程适配性。	开销来自OSPF邻接维护、多虚拟子网路由表管理，巨星座下需考虑星上资源调度。
	ACO-RL ^[36]	面向RL增强路由	强化学习增强蚁群搜索的拥塞规避与负载均衡。	万星级场景下需限制蚁群搜索空间范围，降低控制开销。
高可靠业务	IRIS ^[37]		面向频繁链路故障的渐进式学习与自适应容错路由。	测试复杂度为 $O((N_L \times M_L)^2)$ ， $N_L \times M_L$ 为卫星总数，万星级部署需考虑降低MEO-LEO交互开销。
	CSPF-LST DWSP-LST ^[38]	面向路径选择	融合链路生存预测的可靠性-时延协同选路。	总时间复杂度均 $O((V+E)\log V)$ ，链路状态更新为 $O(E)$ ， V 为节点数， E 为链路数。
	HLLMR ^[39]		可靠性约束下兼顾低时延与负载均衡的低冗余多路径传输。	多路径选择与冗余转发会增加路径维护、链路状态感知开销，万星级部署需限制备选路径数量与冗余转发比例。

来显著控制开销。因此，巨星座路由管控架构应引入逻辑地址与物理节点解耦机制，例如对于依赖全局状态同步或集中式周期重算的算法，可通过区域划分、节点聚合或虚拟节点映射等方式降低拓扑复杂度；对于依赖本地状态的分布式算法，结合预测信息和跨区域协调机制，避免局部最优和路由环路等问题。

当前，低轨巨星座网络路由管控架构在工程实践中呈现多样化演进趋势，例如Starlink侧重基于激光ISL支撑星间分布式动态路由更新；

OneWeb探索采用分层路由架构；“GW”星座侧重SDN集中控制架构；“千帆”星座更强调以星地协同路由为核心的混合控制。随着低轨卫星组网向巨星座方向发展，单一集中式或分布式路由管控架构均存在适用边界，结合两者优势的混合路由管控架构成为解决低轨巨星座网络路由难题的关键^[40]。例如文献[41]探讨了一种基于多智能体强化学习的联合路由（MARL-based Joint Routing, MARL-JR）算法，通过集中式预训练初始化Q表来防止计算过载，并通过分布式在轨训练实

表3 不同路由管控架构对比

路由管控架构	决策主体与决策方式	优点	局限	适用场景与典型案例
集中式	地面控制中心、SDN控制器等统一收集网络状态并计算路由。	具备全局视图，方便统一流量调度与QoS控制。	容错性较弱，巨星座场景下状态同步与路由下发开销较大。	适用拓扑可预测、全局优化等场景。例如：确定性业务集中资源预留、基于SDN的集中式控制架构 ^[37] 、TSN中IEEE 802.1Qcc的集中式配置思想等。
分布式	卫星节点基于本地链路、队列和邻居状态独立决策。	响应速度快，鲁棒性和扩展性较好。	缺乏全局视角，易陷入局部最优，非均匀流量和大规模业务并发场景下可能出现负载失衡。	适用链路频繁切换、星上自治转发场景。例如：Starlink基于ISL的分布式动态路由表更新、DGR等分布式多路径路由方法 ^[27] 、基于分布式执行的多智能体路由方法等。
混合式	全局规划与局部自治结合，按区域、轨道或功能分层管控，簇头节点实时决策。	兼顾全局优化，局部快速响应，抑制全网状态泛洪开销。	架构复杂，需解决簇头选择、层间协同机制设计和跨域一致性等问题。	适用于巨星座、多轨异构、星地融合场景。例如：“千帆”星座星地协同混合控制架构、CMADR中集中式训练指导分布式决策 ^[34] 、MARL-JR中集中式预训练+分布式在轨训练 ^[41] 、FL-A2C智能路由架构 ^[43] 等。

现了实时链路状态感知与快速路由决策；文献[42]对比集中式与分布式路由性能，指出分布式路由在高动态场景下可凭借局部实时状态改善吞吐量与端到端时延，但受限于局部视图，仍难以支撑大规模业务的全局最优调度。

针对混合式路由管控架构，文献[43]考虑到星载资源受限、模型协同训练难度高及数据安全风险问题，提出基于分布式云构建的分层分布式混合管理架构，将分层路由管控与联邦深度强化学习（Federated Deep Reinforcement Learning, FDRL）结合，通过LEO卫星节点动态分簇构建分布式云，进行簇内智能路由模型训练与模型聚合，将FedProx算法与“优势演员-评论家”（Advantage Actor-Critic, A2C）算法结合，提出了基于FL-A2C的智能路由算法。如图4，该混合管理架构采用动态分簇机制构建分布式云，地面站基于时变网络拓扑和卫星差异能力对LEO卫星进行分簇以构建分布式云，每个簇中由一颗簇头（Cluster Head, CH）节点担任LEO卫星的边缘服务器，其余多颗LEO卫星成员（Cluster Member, CM）节点作为客户端，并根据卫星平均连接度选出多颗CH节点卫星作为中心参数服务器。接着，在分布式云基础上，CM节点通过A2C算法

进行本地模型训练，在完成一定轮次之后基于联邦学习（Federated Learning, FL）框架在CH节点上使用FedProx算法进行联邦聚合，进而实现混合管理架构下的局部路由规划。仿真结果表明，在不同数据包数量下，FL-A2C算法能够有效提高网络平均吞吐量和减少数据包平均路由跳数。对比Sarsa、MAD2QN和REINFORCE三种基准算法，FL-A2C算法的网络能量效率分别提升55.6%，42.9%和45.8%，对应地降低了训练过程中的额外通信与计算能耗，与A2C算法性能接近，但由于无需显式数据传输，从而提升数据隐私保护能力。

3.2 相关标准化工作

当前，低轨巨星座网络路由协议尚未形成统一标准，不同标准组织分别从系统架构、确定性转发与可扩展路由等层面推进。具体地，卫星网络标准化正从接入规范向星地融合、多轨协同与业务感知路径管理延伸，并推动路由由全局同步式被动收敛向分层聚合、预测调度与确定性转发演进。

在系统架构层面，国际电信联盟无线电通信部门（International Telecommunication Union Radiocommunication Sector, ITU-R）以IMT-2030为

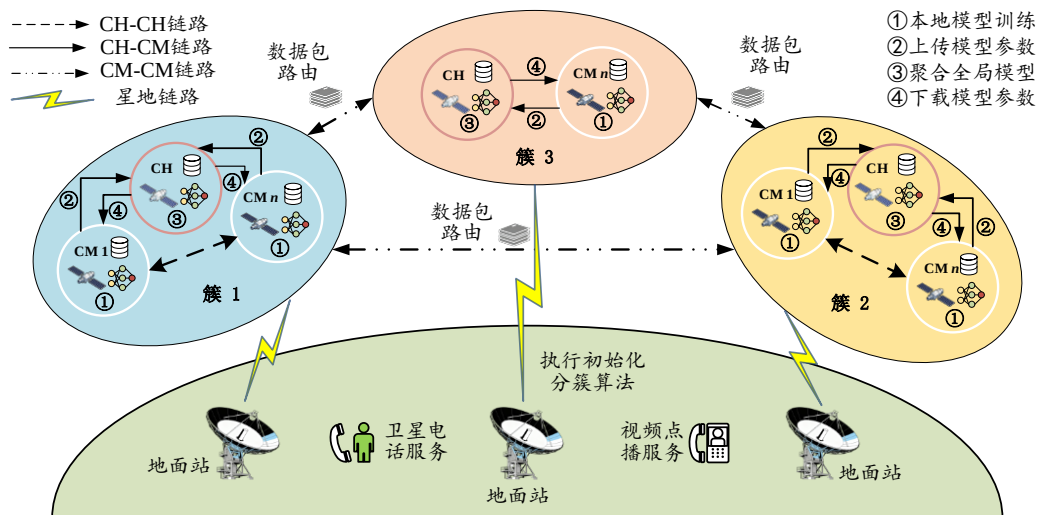


图4 基于分层分布式管理架构的智能路由模型^[43]



框架推动卫星、UAV等非地面网络与地面移动通信系统融合^[44]；3GPP R17将NTN纳入5G体系，并在TS 23.501^[45]和TS 23.502^[46]中明确卫星链路时延和拓扑周期性变化对路径的影响；R18-R20^{[47][48][49]}逐步由卫星接入增强方案扩展至转发路径集中管理、多轨协同与新业务场景以及面向业务需求的路径选择与控制面/用户面协同。2025年5月，由中国信息通信研究院牵头的《5G卫星无线电接口技术详细规范》明确了3GPP NTN的技术路线，并计划IMT-2030（6G）标准化研究技术规范于2031年完成^[50]。卫星路由的标准化重点逐步转向星地融合环境下的跨域路径管理和业务感知路由。

在转发机制层面，IEEE 802.1Qch提出循环排队与转发机制（Cyclic Queuing and Forwarding, CQF）保障TSN确定性传输，IEEE 802.15.10^[51]提出二层网状转发（Layer-2 Routing, L2R）轻量级路由机制，基于局部链路状态修正路由表并实现局部最优转发，以降低控制开销^[52]。随着IEEE 802无线通信技术增强，无线局域网支持动态拓扑，其在动态拓扑适应性方面的设计理念可为LEO卫星网络路由设计提供思路^[53]。

在网络层路由方面，互联网工程任务组（The Internet Engineering Task Force, IETF）RFC 9717^[54]采用“轨道组—L1区域—L2聚合”的分层架构，通过Area Proxy（RFC 9666）聚合区域拓扑信息，降低链路状态泛洪和数据库规模；同时以SR为核心，利用轨道动力学预测生成“调度表”，并结合预响应机制支持管理平面下发调度信息。这表明卫星路由标准正向主动调度与分层聚合方向演进。

综上，ITU-R与3GPP侧重星地融合架构及业务路径管理；IEEE-SA侧重确定性传输与局部动态转发；IETF进一步面向巨星座提出分层聚合和预测式路由架构。三类标准分别从系统架构、

转发机制与网络层支撑卫星路由演进，路由机制逐步由被动泛洪收敛转向基于轨道预测的主动调度与分层聚合，并向跨层协同、状态轻量化与确定性传输方向发展，以提升动态拓扑下的路由效率与QoS保障能力。

4 路由技术仿真与验证

当前，针对低轨巨星座网络路由技术的仿真验证主要包括软件仿真、半实物仿真及在轨验证。三类方法构成递进式验证链路：软件仿真用于算法与参数验证，半实物仿真用于软硬件协同及故障测试，在轨验证用于星座组网与部署前评估，见表4。

软件仿真通过完全虚拟的数字环境进行网络性能评估，适用于算法评估与协议优化等早期验证阶段。主流仿真思路通过STK、GMAT、Orekit或FreeFlyer等工具产生卫星轨迹数据，并将其导入离散事件模拟器，以评估特定路由协议下的网络特性^[9]。不同离散事件模拟器优点各不相同，如OPNET软件使用较为方便、NS-3支持用户自定义模型、OMNeT++可扩展性好、Qual-Net仿真速度快、Mininet支持多人协同开发等^[55]。文献[56]通过在OMNeT++和INET的仿真框架内集成TCP CUBIC与HyStart协议，设计了一种拥塞控制策略；文献[57]基于OMNeT++构建LEO卫星TSN仿真平台，通过流量与队列调度机制支撑时延敏感业务的路由验证；文献[58]在NS-3平台上验证了基于MARL的去中心化负载均衡卫星切换策略。尽管软件仿真具备低成本与高灵活性的优势，但难以完全复现复杂空间环境下的硬件非线性特性。

半实物仿真通过将真实通信模组、协议栈或软件定义无线电接入仿真环境，实现虚实结合验证。相比传统软件仿真与物理试验床，数字孪生可借助实时数据动态更新模型，在真实性与规模扩展性之间取得更好平衡^{[59][60]}。文献[59]提出

Plotinus 数字孪生系统，通过微服务、模块化建模及 TapBridge 实现虚拟与真实节点接入。文献[61]采用分层数字孪生架构，容器化建模及位置标识分离机制，提升高速移动卫星网络的同步与服务能力。全要素数字孪生仿真平台框架如图5所示，整体包括抽象与建模层、控制与赋能层及交互与应用层三级层^[62]，其中抽象与建模层实现卫星等实体高保真映射、业务生成、故障注入及虚实融合仿真；控制与赋能层负责仿真调度、数据治理与服务封装；交互与应用层提供3D态势展示和协议分析。该框架可构建大规模星座数字化试验环境，提升协议验证效率并降低部署风险。

在轨验证是卫星系统开发中最高级别的验证方式，但成本极高且风险较大。国际上，2020年，欧洲航天局（European Space Agency, ESA）在真实的 LEO 卫星环境下，将 OPS-SAT 卫星作为验证平台，测试了轻量级 DTN 协议栈 μ D3TN^[63]；2024年，NASA 在 ISS 部署了开源高性能 HDTN 协议栈作为星载网关，首次在 ISS 验证了 BPv7 协议；2025年，日本信息通信研究所

与 SKY Perfect JSAT 验证了 5G 融合网络在异构链路下的动态路由、QoS 控制与流量调度能力。2020年，“行云二号”首次实现了国内 IoT 星座激光通信；2025年，中国移动完成国内首次用于基站回传的 NR-NTN 技术星上验证。

5 低轨巨星座网络路由技术展望

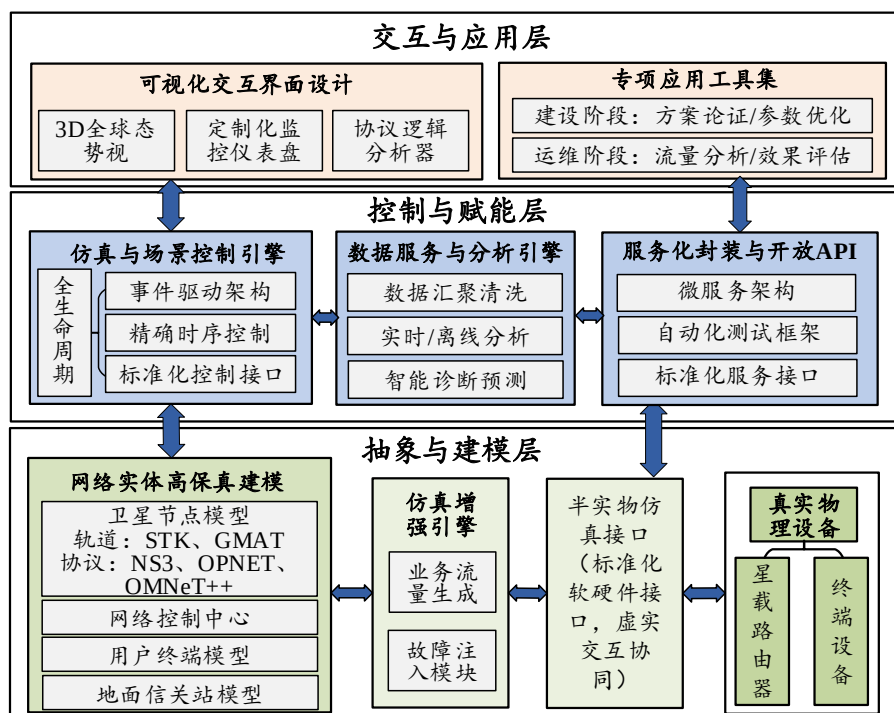
低轨巨星座网络作为未来 6G 网络的重要组成部分，承载着全球覆盖、泛在接入、在轨智能处理和多域互联互通等核心任务。随着业务流向从单一边界向跨域协同转变，路由机制面临的已非单纯的路径计算问题，而是跨域异构协同、有限星上资源全局调配，以及高对抗环境下的安全可信等多方面矛盾的叠加。本节将围绕跨域协同路由、天基算力路由与巨星座可信路由对低轨巨星座网络路由技术进行展望。

5.1 跨域协同路由

面向卫星互联网流量激增与业务需求多样化挑战，低轨巨星座网络需与 MEO/GEO 卫星网络、空中网络、地面网络及海洋网络协同融合，以支撑全域资源调度与异构业务连续传输。然而，低

表4 不同路由技术仿真验证方式对比

验证方式	典型平台或工具	主要优缺点	典型案例
软件仿真	轨道生成：STK、FreeFlyer、GMAT、Orekit 等。 网络仿真：NS-3、QualNet、OM-NeT++ 等。	成本低、便于大规模算法对比和参数分析，但对星载硬件与信道状态刻画不足。	基于 OMNeT++ 拥塞策略 ^[56] /搭建 TSN 仿真平台 ^[57] 基于 NS-3 的 MARL 负载均衡卫星切换验证 ^[58] 。
半实物仿真	软件定义无线电、真实终端设备、虚拟机、容器、微服务、数字孪生仿真平台等。	工程真实性较高、可进行协议测试与故障注入等；但平台复杂与成本较高，大规模复现能力有限。	Plotinus 卫星互联网数字孪生系统 ^[59] 分层数字孪生卫星通信网络 ^[61] 全要素数字孪生仿真平台等 ^[62] 。
在轨验证	真实 LEO/GEO 卫星平台、ISS、真实核心网络设备等。	验证置信度最高，可直接反映实际空间环境影响；但成本高、周期长、风险大。	μ D3TN 协议栈测试 ^[63] HDTN 协议栈作为星载网关并验证 BPv7 协议融合网络动态路由与 QoS 控制实验 “行云二号”星间激光通信验证 中国移动 NR-NTN 上星验证。

图5 全要素数字孪生仿真平台框架^[62]

轨拓扑的剧烈时变性和ISL 中断的突发性，与地面网络稳定的链路特性、GEO 静态覆盖特性形成了根本性的度量体系割裂。集中式统一度量建模难以兼顾毫秒级星间切换与秒级地面链路时延抖动，导致跨域路径选择的计算复杂度随网络节点数呈指数增长。针对该挑战，实现高效跨域协同路由，当前主要有两条技术路径：其一，通过网络功能虚拟化将物理拓扑与逻辑寻址剥离，将业务承载限定于由虚拟网络功能映射的虚拟网格内，以此隔离底层 ISL 变化对路由表的影响，降低重算频率；其二，构建包含轨道运动、链路衰减、负载波动在内的数字孪生镜像环境，利用图神经网络提取跨层拓扑的时空相关性，并引入分布式联邦强化学习实现路由策略的在线演化。此外，针对不同业务对数据精度的容忍差异，可采用语义通信与比特传输并行的混合转发模式，前者对感知类、推理类任务进行特征级压缩以节省带宽，后者对控制信令等关键流维持完整校验，以此在传输效率与可靠性之间取得折中。

5.2 天基算力路由

地面算力网络强调集中化资源池调度，而天基节点算力、存储和能源均受严格物理约束，因此天基算力路由本质是在时变的通信链路和异构的计算节点之间建立联合决策面，使任务在数据源端就近完成预处理，以缓解星地回传压力。在巨星座规模下，每个卫星节点需周期性泛洪自身的算力负载、缓存状态和链路质量，这类通告本身即消耗宝贵的 ISL 带宽，当节点数逾千时，通告开销将挤压有效数据传输，形成“为算力寻路而阻塞通信”的负收益。针对该挑战，低轨巨星座网络可以通过引入轻量级图神经网络（Graph Neural Network, GNN）模型，在局部邻域内聚合链路状态与节点负载特征，替代全局状态广播，以减小决策延迟；同时将容器化和微服务架构移植至星载平台，使 CPU、GPU、FPGA 等异构算力资源可按任务类型，如模型推理、数据压缩、路由计算等动态组合，提高单节点资源复用率。此外，还可以结合 SDN 控制面与网络切片，对通

信带宽、计算周期和缓存空间进行时间维度的细粒度编排,并针对频繁访问的星历数据、AI模型参数建立分布式协同缓存,避免重复回传和重复计算。

5.3 巨星座可信路由

低轨巨星座网络作为战略基础设施,其路由系统的脆弱性主要体现在两个方面。一是内部稳定性风险:拓扑的极端动态性使得常规距离向量或链路状态协议在遭遇太阳风暴、碎片碰撞等突发事件时,极易产生路由振荡和慢收敛,且单节点失效可能通过ISL扩散至整个星座,触发大规模重路由风暴。二是外部安全风险:大规模周期性路由更新广播为恶意节点注入伪造链路状态、篡改邻接关系提供了充足的攻击窗口;更隐蔽的是,当路由决策与姿态控制耦合时,虚假路由信息可能诱导卫星调整波束指向或天线对准,从而偏离轨道安全包络。针对上述威胁,潜在的技术布局主要包括以下几个方面。在身份可信认证方面,采用零信任架构下的微分段和持续身份验证,对每个路由更新包附加基于星载可信根的时间戳与签名,拒绝未经验证的邻接关系变更;在链路层面,通过增加单星可连接的ISL数量并设计动态中继绕行协议,形成多条冗余物理路径以抵抗定点失效;在威胁感知层面,利用深度学习提取路由表中的异常序列模式,并结合GNN对正常拓扑流量进行基线建模,实现对欺骗报文和洪泛攻击的分布式近实时检测;在隐私保护层面,引入随机多径调度和概率转发机制,以增大第三方流量溯源的复杂度,同时结合联邦学习训练路由模型,使原始流量数据不出卫星即完成模型参数聚合,降低星地链路中敏感元数据暴露的风险。

6 结论

本文聚焦低轨巨星座网络路由技术,首先围绕时延容忍与时延敏感性从业务类型角度,对低

轨巨星座网络路由技术进行分类综述;总结对比了路由管控架构,重点介绍了一种基于分布式云构建的混合式路由管控架构与智能路由方法,接着概述了低轨巨星座路由相关的标准化工作;然后总结对比了巨星座网络路由技术的仿真平台与验证方法;最后从跨域协同路由、天基算力路由和巨星座可信路由三个方面进行了展望,以期为低轨巨星座网络路由技术的理论研究与实践部署提供参考。

7 参考文献:

- [1] Sun Y, Peng M, Zhang S, et al. Integrated satellite-terrestrial networks: Architectures, key techniques, and experimental progress[J]. IEEE Network, 2022, 36(6): 191-198.
- [2] Luo X, Chen H H, Guo Q. LEO/VLEO satellite communications in 6G and beyond networks - technologies, applications, and challenges[J]. IEEE Network, 2024, 38(5): 273-285.
- [3] Shang Z, Zhang X, Li X. Maritime communication networks: A survey on architecture, key technologies, and challenges[J]. Computer Communications, 2025, 241: 108255.
- [4] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要[N]. 人民日报,2026-03-14(001).
Outline of the 15th Five-Year Plan for the National Economic and Social Development of the People's Republic of China [N]. People's Daily, 2026-03-14(001).
- [5] Zeng G, Zhan Y, Xie H. Channel allocation for mega LEO satellite constellations in the MEO - LEO networked telemetry system[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 10(3): 2545-2556.
- [6] 赖新权,黎璐玫.低轨互联网卫星发展现状及监测方法研究[J].中国无线电,2024,(05):59-60+72.
Lai X Q, Li L M. Research on development status and monitoring methods of LEO internet satellites. China Radio, 2024, (05): 59-60+72.
- [7] IMT-2030(6G) Promotion Group. 6G white paper on overall vision and potential key technologies[R].2021.
- [8] Liao H, Zhang X, Zhou J, et al. Real-time routing design for leo satellite networks: An enhanced multi-agent drl approach [C]//2024 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops). IEEE, 2024: 547-552.
- [9] 孙耀华,冯昕澳,彭木根.低轨巨型星座组网:挑战与关键技术[J].天地一体化信息网络,2024,5(04):57-74.
Sun Y H, Feng X A, Peng M G. Networking for LEO mega-



- constellations: Challenges and key technologies. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2024, 5(04): 57-74.
- [10] Westphal C, Han L, Li R. Leo satellite networking relaunched: Survey and current research challenges[J]. *arXiv preprint arXiv: 2310.07646*, 2023.
- [11] Wang F, Wu D, He W, et al. CPF: bridging time-sensitive networks into large-scale LEO satellite networks[C]//2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). IEEE, 2023: 1-6.
- [12] Du Z, Jiao J, Liu H, et al. Multi-attribute consistency segment resilient routing for LEO satellite mega constellations[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2025, 24(10): 10823-10839.
- [13] Zhang J, Wang K, Li R, et al. MaCro: Mega-constellations routing systems with multi-edge cross-domain features[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2023, 30(6): 69-76.
- [14] 郑爽,张兴,王文博. 低轨卫星通信网络路由技术综述[J]. *天地一体化信息网络*, 2022, 3(03): 97-105.
- Zheng S, Zhang X, Wang W B. Survey on routing technologies for LEO satellite communication networks. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2022, 3(03): 97-105.
- [15] 张贤,王东东,周政,等. 多波束LEO卫星海洋通信网络联合波位划分的无线资源调配方法[J]. *通信学报*, 2026, 47(5): 195-207.
- Zhang X, Wang D D, Zhou Z, et al. Wireless resource allocation method with joint beam position division for multi-beam LEO satellite maritime communication networks. *Journal on Communications*, 2026, 47(5): 195-207.
- [16] 张佳鑫,常朝阳,张易隆,等. 巨型星座路由技术综述[J]. *天地一体化信息网络*, 2024, 5(01): 2-13.
- Zhang J X, Chang C Y, Zhang Y L, et al. Survey of routing technologies for mega-constellations. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2024, 5(01): 2-13.
- [17] 李佳奇,陈全,杨磊. 低轨巨型星座路由技术研究现状及展望[J]. *空间电子技术*, 2025, 22(02): 1-12.
- Li J Q, Chen Q, Yang L. Research status and prospects of routing technologies for LEO mega-constellations. *Space Electronic Technology*, 2025, 22(02): 1-12.
- [18] 朱立东,张勇,贾高一. 卫星互联网路由技术现状及展望[J]. *通信学报*, 2021, 42(08): 33-42.
- Zhu L D, Zhang Y, Jia G Y. Current status and prospects of satellite internet routing technology. *Journal on Communications*, 2021, 42(08): 33-42.
- [19] Elbehiry E A, TagEIDien H A, Fares A, et al. Survey on routing algorithms for LEO constellations network[J]. *Fayoum University Journal of Engineering*, 2024, 7(2): 89-99.
- [20] CERF V, BURLEIGH S, HOOKE A, et al. Delay-Tolerant Networking Architecture: RFC 4838 [S]. IETF, 2007.
- [21] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): 3GPP TR 38.821 V16.1.0 [R]. Valbonne, France: 3GPP Organizational Partners, 2021.
- [22] Jain S, Fall K, Patra R. Routing in a delay tolerant network[C]//Proceedings of the 2004 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications. 2004: 145-158.
- [23] Wood L, Ivancic W D, Eddy W M, et al. Use of the delay-tolerant networking bundle protocol from space[C]//59th International Astronautical Congress and Exhibition 2008 (IAC). 2009 (E-16810).
- [24] Peng Y, Zhao K, Li W. Scalable Near-optimal Routing Method for Space Delay Tolerate Network[C]//2023 9th International Conference on Computer and Communications (ICCC). IEEE, 2023: 29-33.
- [25] Madoery P G, Kurt G K, Yanikomeroğlu H, et al. Routing heterogeneous traffic in delay-tolerant satellite networks[J]. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2023, 7: 390-401.
- [26] Liu G, Jiang X, Li H, et al. An Improved DTN Scheme for Large-Scale LEO Satellite Networks[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2023, 2023(1): 4899124.
- [27] Yang P, Cai L, Chang T. Dgr: Delay-guaranteed routing protocol[C]//2023 IEEE 20th International Conference on Mobile Ad Hoc and Smart Systems (MASS). IEEE, 2023: 19-27.
- [28] Kopetz H, Ademaj A, Grillinger P, et al. The time-triggered Ethernet (TTE) design[C]//Eighth IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC'05). IEEE, 2005: 22-33.
- [29] 黄韬,汪硕,黄玉栋,等. 确定性网络研究综述[J]. *通信学报*, 2019, 40(06): 160-176.
- Huang T, Wang S, Huang Y D, et al. Survey on deterministic networking. *Journal on Communications*, 2019, 40(06): 160-176.
- [30] Bélanger O, Lupien J L, Yahia O B, et al. Online Convex Optimization for On-Board Routing in High-Throughput Satellites [J]. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2026, 23(6): 499-506.
- [31] Elbehiry E A, Fares A, Elhalawany B M, et al. Inter-mesh routing algorithms in LEO satellite constellations networks[J]. *Computing*, 2025, 107(2): 57.
- [32] Kedrowitsch A, Black J, Yao D. Resilient routing for low Earth orbit mega-constellation networks[C]//Proceedings of the NDSS Workshop on Space Security (SpaceSec), San Diego, CA, USA. 2024, 1.

- [33] LIU Yang, WANG Li-na. LEO satellite intelligent-sensing routing algorithm based on a dendrite network[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(3): 465-474.
- [34] Lyu Y, Hu H, Fan R, et al. Dynamic routing for integrated satellite-terrestrial networks: A constrained multi-agent reinforcement learning approach[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2024, 42(5): 1204-1218.
- [35] 李嵩泉, 贾慧燕, 范玉超, 等. 基于 BIRD 的路由处理模块在高通量卫星网络中的应用[J]. 计算机与网络, 2024, 50(05): 434-439.
- Li S Q, Jia H Y, Fan Y C, et al. Application of routing processing module based on BIRD in high-throughput satellite networks. Computer & Network, 2024, 50(05): 434-439.
- [36] Xia D, Wucheng L, Yingxin H, et al. A load-balancing routing algorithm based on ant colony optimization and reinforcement learning for LEO satellite networks[J]. China Communications, 2025, 22(12): 281-294.
- [37] Wei W, Fu L, Gu H, et al. Iris: Toward intelligent reliable routing for software-defined satellite networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 73(1): 454-468.
- [38] 张硕, 牛庆庆, 缪馨, 等. 基于马尔可夫模型的卫星网络链路通断分析与可靠路由算法研究[J]. 电信科学, 2025, 41(11): 118-130.
- Zhang S, Niu Q Q, Miao X, et al. Research on link connectivity analysis and reliable routing algorithm for satellite networks based on Markov model. Telecommunications Science, 2025, 41(11): 118-130.
- [39] Wang Y, Cai L, Liu J. High-reliability, low-latency, and load-balancing multipath routing for LEO satellite networks[C]//2023 Biennial Symposium on Communications (BSC). IEEE, 2023: 107-111.
- [40] Feng X, Sun Y, Peng M. Distributed satellite-terrestrial cooperative routing strategy based on minimum hop-count analysis in mega LEO satellite constellation[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23(11): 10678-10693.
- [41] Xia L, Lin B, Zhao S, et al. A Centralized - Distributed Joint Routing Algorithm for LEO Satellite Constellations Based on Multi-Agent Reinforcement Learning[J]. Applied Sciences, 2025, 15(9): 4664.
- [42] Ramakanth R V, Modiano E. Centralized versus distributed routing for large-scale satellite networks[C]//2025 23rd International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt). IEEE, 2025: 1-8.
- [43] LI X, LIAO H, ZHANG X, et al. Federated deep reinforcement learning-based intelligent routing design for LEO satellite networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2025, 47(8): 2652-2664.
- [44] ITU. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond[R]. 2023.
- [45] 3GPP TS 23.501 V17.4.0 System architecture for the 5G System (5GS)[S]. 2022.
- [46] 3GPP TS 23.502 V17.4.0 Procedures for the 5G System (5GS) [S]. 2022.
- [47] 3GPP. Study on integration of satellite components in the 5G architecture: Phase 2: 3GPP TR 23.700-28 V18.1.0[R]. 2023.
- [48] 3GPP. Study on integration of satellite components in the 5G architecture: Phase 3: 3GPP TR 23.700-29 V19.0.0[R]. 2024.
- [49] 3GPP. Study on integration of satellite components in the 5G architecture: Phase 4: 3GPP TR 23.700-19 V20.0.0[R]. 2026.
- [50] ITU-R. Report on the fifty-sixth meeting of Working Party 4B (Shanghai, China, 30 April - 6 May 2025): R23-WP4B-C-0139 [R]. 2025.
- [51] IEEE. IEEE Recommended Practice for Routing Packets in IEEE 802.15.4 Dynamically Changing Wireless Networks: IEEE Std 802.15.10-2017 [S]. New York: IEEE, 2017: 1-143.
- [52] Infrastructure L E C, Layer M L P. IEEE standard for low-rate wireless networks[J]. IEEE Stand, 2015, 2015: 1-708.
- [53] IEEE. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Overview and Architecture: IEEE Std 802-2024 (Revision of IEEE Std 802-2014 as amended by IEEE Std 802d-2017, IEEE Std 802c-2017, and IEEE Std 802f-2023) [S]. New York: IEEE, 2025: 1-99.
- [54] Li T. A Routing Architecture for Satellite Networks[J]. RFC 9717, IETF, 2025.
- [55] 倪少杰, 岳洋, 左勇, 等. 卫星网络路由技术现状及展望[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(2): 383-395.
- Ni S J, Yue Y, Zuo Y, et al. Current status and prospects of satellite network routing technology. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(2): 383-395.
- [56] Martino L, Deutschmann J, Hielscher K S, et al. TCP CUBIC with HyStart: Congestion Control for Satellite Communication in OMNeT++ INET[C]//2024 IEEE 29th Asia Pacific Conference on Communications (APCC). IEEE, 2024: 19-25.
- [57] 赵崇尧, 孙耀华, 冯昕澳, 等. 基于 OMNeT++ 的低轨卫星时间确定性网络仿真平台设计[J]. 电信科学, 2025, 41(05): 43-59.
- Zhao C Y, Sun Y H, Feng X A, et al. Design of time-deterministic network simulation platform for LEO satellites based on OMNeT++. Telecommunications Science, 2025, 41(05): 43-59.
- [58] Badini N, Jaber M, Marchese M, et al. Reinforcement learning-based load balancing satellite handover using NS-3[C]//ICC 2023-IEEE International Conference on Communications.



- IEEE, 2023: 2595-2600.
- [59] Gao Y, Qiu K, Chen Z, et al. Plotinus: A satellite internet digital twin system[J]. Journal of Communications and Information Networks, 2024, 9(1): 24-33.
- [60] LIN Jiawei, ZHANG Yujie, WU Xiaoming, LIU Jianhua. A Generalized Satellite Digital Twin System for Satellite Operations[J]. Aerospace China, 2025, 26(1): 14-23.
- [61] Zhou Y, Zhang R, Liu J, et al. A hierarchical digital twin network for satellite communication networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(11): 104-110.
- [62] 北京中科数遥信息技术有限公司. 卫星路由协议全要素数字孪生系统结构 [EB/OL]. (2025-10-31) [2026-01-30]. https://suyoo.com.cn/page155?article_id=148.
Beijing Suyoo Information Technology Co., Ltd. Architecture of all-element digital twin system for satellite routing protocols [EB/OL]. (2025-10-31) [2026-01-30]. https://suyoo.com.cn/page155?article_id=148.
- [63] Walter F, Feldmann M, Fraire J A, et al. The Architectural Refinement of μ D3TN: Toward a Software-Defined DTN Protocol Stack[C]//2024 IEEE 10th International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT). IEEE, 2024: 161-170.

[作者简介]



张贤 (1992-), 男, 博士, 讲师、硕士生导师, 研究方向为非地面无线网络和通感算融合等。



周家恩 (2001-), 男, 博士生, 研究方向为卫星通感算一体化技术等。



李学华 (1977-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能无线通信与计算。

于泓源 (2002-), 男, 北京信息科技大学硕士研究生, 研究方向为低轨卫星通信网络智能路由和强化学习等。