

低轨巨型星座组网：挑战与关键技术

孙耀华，冯昕澳，彭木根

(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：得益于卫星制造与火箭发射技术的进步，巨型低轨星座组网已成为未来卫星互联网的重要发展方向。与传统低轨星座相比，多轨道混合组网，不同高度卫星分层联合形成的多轨、异构混合巨型星座具有节点数量更多、拓扑动态性更强等新特征。面向此类特点，首先从星座设计、协议融合、拓扑表征、路由算法、网络仿真等5个方面总结巨型低轨星座组网面临的挑战，然后从网络架构、协议设计、网络编址、星间建链、故障恢复等方面介绍巨型星座组网关键技术，并对其发展方向进行展望，以期对我国卫星互联网建设提供参考。

关键词：低轨卫星网络；巨型星座组网；卫星路由

中图分类号：TN927.2

文献标识码：A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024039

Mega LEO Satellite Constellations Networking: Challenges and Key Technologies

SUN Yaohua, FENG Xinao, PENG Mugen

State Key Laboratory of Networking and Switching Technology,
Beijing University of Post and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Owing to the advances in satellite manufacturing and rocket launch technology, the deployment of mega LEO constellations has become an important direction for the development of satellite Internet. Compared with traditional LEO constellations, new mega constellations, characterized by multi-orbit hybrid networking and stratified integration of satellites at different altitudes, exhibit new features such as a greater number of nodes and more dynamic topology. In light of these features, this paper first summarized the challenges of mega LEO constellations networking from five aspects: constellation design, protocol integration, topology representation, routing algorithms, and network simulation. It then introduced the key technologies for mega constellation networking, included network architecture, protocol design, network addressing, inter-satellite link establishment, and fault recovery, and provided outlooks on their development directions, aimed to offer references for the construction of Chinese satellite Internet.

Keywords: LEO satellite network, mega constellations networking, satellite routing

0 引言

国际电信联盟（ITU）在《IMT 面向 2030 及未来发展的框架和总体目标建议书》中明确指出“泛在连接”是 6G 的主要应用场景之一^[1]。为实现“泛在连接”中

“任何人，任何时间，任何地点”都可以通信的移动通信目标^[2]，拥有覆盖范围广、抗毁能力强、不受地理环境制约^[3-4]等优势的卫星通信系统成为 6G 建设中的关键一环^[5]。卫星通信系统可由多种卫星构成，根据轨道高度不同，可将其进一步分为地球静止轨道（Geostationary

收稿日期：2024-09-01；修回日期：2024-11-13

通信作者：冯昕澳，fengxinao@bupt.edu.cn

基金项目：国家自然科学基金资助项目（No. 62371071, No. 62001053），中国通信学会青年人才托举项目（No. 2021QNRC001）

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.62371071, No.62001053), Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (No. 2021QNRC001)

Earth Orbit, GEO) 卫星, 中轨 (Medium Earth Orbit, MEO) 卫星和低轨 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星。GEO 和 MEO 卫星较高的轨道高度导致其对地传播时延在 30~120 ms^[6], 无法满足当前地面用户低时延的通信需求。相比 GEO 和 MEO 卫星, LEO 卫星凭借对地传播时延小、信号衰减少、单点故障易解决等优势成为产学研界的研究热点^[7]。LEO 卫星轨道高度较低 (500~1 500 km), 导致单星覆盖区域半径仅为几百千米, 因此需要通过大规模部署才能实现全球覆盖并满足用户的 QoS 需求, 早期 LEO 卫星高昂的研制和发射成本成为阻碍其大规模部署的重要因素^[8-10]。

近年来, 随着工业生产和通信技术的不断进步, 低轨星座网络得以再次兴起。先进的集成电路技术和批量化、模块化的卫星制造技术使卫星制造成本显著降低^[11-12], SpaceX 公司已将单颗卫星的制造成本从铱星二代的 3 067 万美元/颗降低至 50 万美元/颗, 同时 Starlink 卫星容量为 OneWeb 的 23.3 倍, 但成本仅为其一半, 具有显著的成本效益。“一箭多星”技术大大提高了卫星发射效率, 2021 年 1 月, SpaceX 公司使用“猎鹰 9”号火箭实现一箭 143 星, 创造全球单次卫星发射数量新纪录。2024 年 6 月 27 日, SpaceX 公司的 B1062.22 一级火箭完成第 22 次回收, 打破了火箭复用最高纪录, 进一步缩小了卫星的发射成本。在采用最新技术和星舰可重复发射 22 次的前提下, Starlink 卫星的发射成本已降至 300 美元/千克, 该成本约为当前国内民营航天发射单价 (2 万人民币/千克) 的 1/10~1/9 水平。马斯克曾表示当火箭重复利用 10 次以上时, 单次发射的净利润可达 5 000 万美元。此外, 波束成形以及光学星间链路等技术使得卫星拥有了更高的传输速率、更灵活的覆盖能力和更大的系统容量 (单星容量数十 Gbit/s, 系统容量达 Tbit/s 量级。据 Space Capital 机构预测, 2026 年全球卫星通信行业理论容量预计可达 218 Tbit/s, 其中 91% 来自 LEO 卫星)^[13-15]。同时, 随着星间激光通信技术的成熟, 星间链路带宽在 2030 年预计可达 100 Gbit/s 以上^[16], 卫星间可实现大带宽直接组网, 不但解决了海外信关站部署难问题, 还避免了星地多跳数据转发, 可大幅减小端到端通信时延^[17]。因此, 传统低轨星座网络部署成本高、传输速率慢、业务范围窄的问题得以解决, 巨型低轨星座低成本、高带宽、低时延的全球互联服务优势愈发凸显^[18], 其蕴含的商业价值不容小觑。为抢占国际战略制高点, 在技术、需求的双重驱动下, 国内外争相开展大规模低轨星座部署

计划。截至 2024 年 6 月 30 日, SpaceX 公司已发射 6 698 颗星链卫星, 其中约 6 220 颗在轨正常运行, 占全球活跃低轨卫星总量的 64%。同时, 其计划 2024 年完成约 12 000 颗星链卫星的部署, 并在 2027 年将该数值进一步增加至 42 000 颗, 从而完成无死角全球覆盖。2020 年 4 月我国将卫星互联网纳入新型基础设施建设范围, 2022 年《“十四五”数字经济发展规划》中明确指出要“建设天地一体的数字信息基础设施, 加快布局卫星通信网络, 推动卫星互联网建设”。中国卫星网络集团有限公司已向国际电信联盟提交 GW-A59 和 GW-2 宽带互联网星座计划, 预计建设一个由 12 992 颗卫星组成的大规模低轨星座系统。上海市政府于 2023 年 12 月 30 日开始推动 G60 星座建设, 预计 2027 年形成完整产业链, 并最终建设具有 12 000 颗卫星的低轨星座, 满足全球宽带网络传输需求。此外, 2024 年 5 月 4 日, 上海蓝箭鸿擎科技有限公司向 ITU 申报了“鸿鹄 3 号”星座计划, 包含共计 10 000 颗卫星, 分布在 160 个轨道面上, 该星座成为我国第 3 个拥有过万卫星数量的低轨卫星星座。当前, 全球卫星数量正处在爆发式增长阶段, 低轨卫星互联网将正式迈入大规模、巨型化时代^[19]。

1 巨型低轨星座组网挑战

巨型低轨星座通常由数千颗卫星组成^[20], 这些卫星部署在不同类型、不同高度的轨道面内, 且具备星上处理能力并搭载收发机载荷。在星座中, 卫星可通过星间链路进行组网, 最终形成跨轨、异构的混合巨型星座, 可在全域全立体空间提供“泛在连接”。与传统低轨星座相比, 巨型低轨星座的星座规模急剧上升, 使其具有了构型更复杂、节点数量更多、拓扑动态性更强的新特征, 为巨型低轨星座组网带来了全新挑战。

(1) 星座设计约束多: 星座构型设计是部署低轨星座网络的前提和关键。在进行构型设计时, 通常会根据覆盖率或用户 QoS 需求, 采用几何解析法或优化设计法^[21]得到轨道高度、卫星数量、轨道个数等, 从而完成星座设计。与传统低轨星座不同, 巨型星座庞大的卫星节点数量与复杂的连接关系为网络建模带来困难, 同时巨型星座中存在大量异构卫星, 其在覆盖能力、星载资源等方面具有显著差异, 成为了星座设计时必须考虑的实际约束。因此, 在多个约束条件下, 如何设计满足需求的卫星星座, 同时尽量减少卫星部署成本和构型设计开销成为巨型星座组网中的一大挑战。

(2) 网络协议融合难: 网络协议是卫星网络实现端到端数据传输的上层保障, 然而在较大时延、较高误码率的卫星通信场景下, 地面成熟的TCP/IP协议体系在传输效率方面将大打折扣。面向卫星通信特殊的传播环境, 虽然已有空间通信协议规范(Space Communication Protocol Standards, SCPS)、容迟网络(Delay Tolerant Network, DTN)等星间通信协议被提出, 但受到传输环境、星上载荷能力等多种因素制约, 其发展仍远远落后于地面网络^[22]。通常, 巨型星座网络中会存在多种频段的星间链路, 同时多系统互相级联的异构组网模式也将进一步加剧多种网络协议共存问题, 因此面向未来天地一体化发展趋势, 如何实现星间、星地网络协议融合, 使不同卫星运营商间可以互联互通也是一大挑战^[18]。

(3) 星座拓扑强动态: 利用星上搭载的收发机载荷, 卫星间可建立一条或多条星间链路, 完成天基网络构建。在传统单层低轨星座中, 通常采用“一星四链”结构实现星间组网, 最终整个星座会形成规则曼哈顿网络^[23-24], 这种网络具有链路稳定、组网简单等性能优势。在巨型星座下, 基于“一星四链”结构的星座拓扑会使网络平均端到端转发跳数明显增加, 大幅恶化网络传输效率^[25-26]。同时除同层卫星内建立的星间链路, 不同轨道高度的卫星间也能建立层间链路, 满足巨型星座跨轨组网需求。不同高度的卫星间存在较为明显的相对运动, 使层间链路频繁通断, 导致网络拓扑具有较强动态特性, 因此, 如何在保障传输效率的前提下设计星间建链方案, 尽量减小链路通断频率从而降低网络拓扑管理开销成为巨型星座组网中的一大挑战。

(4) 路由算法开销大: 路由算法是保障卫星节点互联互通以及高效数据传输的技术基础, 地面网络中成熟的OSPF、RIP等路由协议都是面向相对稳定的地面拓扑进行设计的, 低轨卫星网络拓扑和业务负载的高动态特性将导致这类路由策略面临无穷收敛问题, 严重损耗昂贵的星间链路带宽资源^[27]。此外, 在巨型星座下, 适用于传统低轨星座的路由方法面临泛洪开销大、存储资源消耗多、算法复杂度高等一系列问题。因此, 面向巨型低轨星座超高节点数量及强动态网络拓扑, 如何设计低开销、低复杂度、稳定易收敛的轻量化路由算法, 在保障用户差异化业务需求的同时, 尽可能实现网络负载均衡, 成为了巨型低轨星座组网中的重要挑战。

(5) 网络仿真效率低: 随着低轨卫星的加速部署,

对星座网络进行实验验证与性能评估变得迫在眉睫, 这是保障网络能力满足预期指标的重要手段。如果在真实网络中进行实验验证, 需要将实验软件预先装载在卫星上, 再将实验星发射至太空中。面向当前不断升级、快速迭代, 技术体制多样多变的卫星网络, 这种方法存在周期长、成本高、实验环境不能灵活配置等问题。与之相对的, 通过网络仿真对星座性能进行先期验证, 不但可大幅降低实验成本, 还能灵活开展扩展实验, 充分探索网络性能边界, 降低未来部署风险。巨型星座庞大的网络规模、动态多变的卫星节点以及多维异构的网络资源, 将导致极高的仿真开销与极大的仿真时长^[28]。因此, 面向未来巨型低轨星座, 如何开发真实高效低开销、灵活易用可扩展的巨型星座网络仿真平台, 实现“星未上天而网络能力先知”, 是未来巨型星座组网中的一大挑战。

2 巨型低轨星座组网关键技术

2.1 天地一体化柔性组网架构

传统卫星通信网络和地面移动通信网络各自独立组网, 二者通过卫星互联网互联节点实现业务互通, 该架构存在网络功能配置慢、资源独立管控、流量调度不灵活等缺点, 难以满足未来6G复杂多样的业务需求^[29]。近年来, 随着软件定义网络(Software Defined Network, SDN)和网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV)技术在地面网络的广泛应用, 利用此类技术设计天地一体化柔性可重构网络已成为研究热点。SDN技术将所有的控制逻辑放到SDN控制器中, 实现网络控制平面与数据转发平面分离, 为解决卫星互联网节点在设备、协议上的异质性提供了有效途径^[30]。NFV技术将网络功能与硬件设备解耦, 使网络功能以软件形式运行在通用设备上。根据用户业务需求、网络资源情况、节点处理能力等, 网络编排系统可对节点进行功能定制, 实现网络功能按需重构^[31]。因此, 利用SDN和NFV技术, 打造基于服务架构的天地一体化柔性网络, 实现网络功能快速按需部署, 系统资源统一编排调度, 满足用户多样化服务需求, 是未来6G卫星互联网的重要发展趋势, 本文提出的天地一体化柔性组网架构如图1所示。

该架构利用SDN和NFV技术, 由中高轨卫星、低轨卫星及地面段构成。地面段主要包括用户节点、地面SDN控制器、任务管理中心、网络操作控制中心、地面移动通信网络以及互联网。其中, 任务管理中心和网络

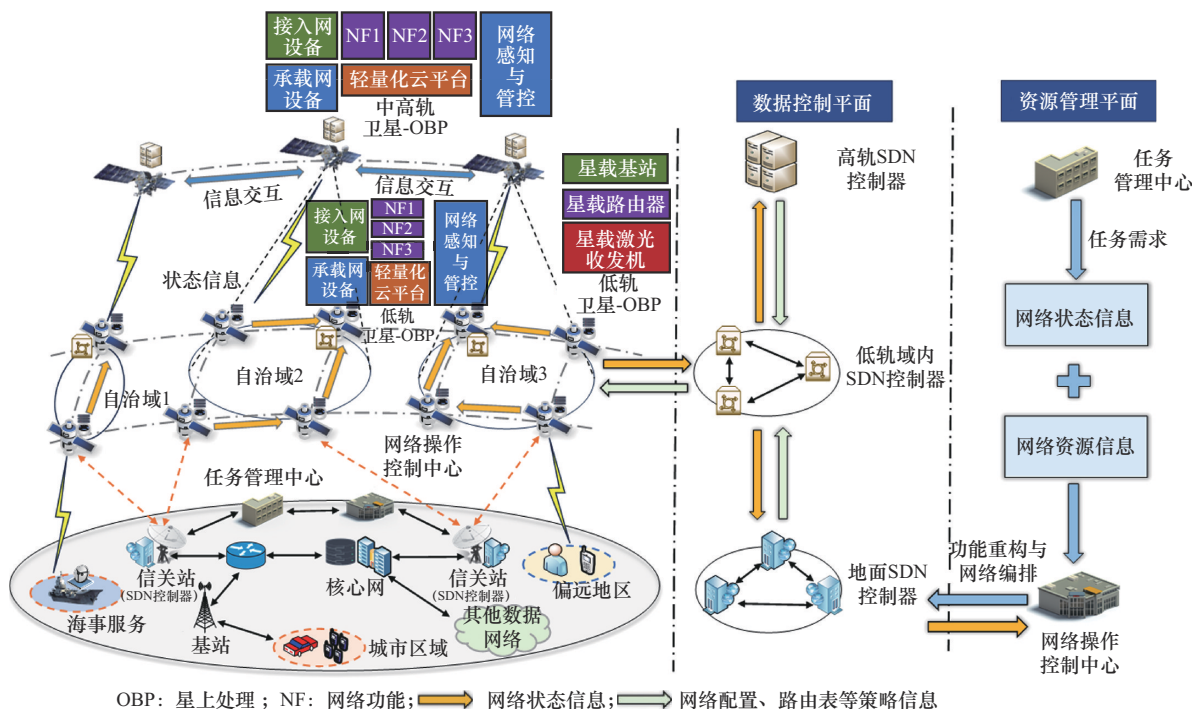


图1 天地一体化柔性组网架构示意

操作控制中心属于资源管理平面，任务管理中心可向网络操作控制中心提出任务需求，网络操作控制中心根据当前网络状态以及资源情况，对网络节点进行功能重构与柔性编排，并将配置信息发送给地面SDN控制器^[32]。由于星地链路的传播时延远小于高轨卫星与低轨卫星间的传播时延，因此当星地链路可用时，地面SDN控制器对低轨星座起控制作用，其负责将网络操作控制中心下发的配置信息、路由表等转发至低轨卫星SDN控制器，再由低轨卫星SDN控制器下发给其余LEO卫星，从而实现网络柔性编排。

当星地链路不可用时，可利用中高轨卫星代替地面SDN控制器，对低轨卫星进行编排控制。具体的，低轨卫星SDN控制器可将收集的网络状态信息通过层间链路上传至中高轨卫星，中高轨卫星利用轻量化云平台进行策略计算，之后将计算得到的网络配置下发至低轨卫星SDN控制器，完成对低轨星座的顶层管理^[33]。与仅在地面部署SDN控制器的方案相比，该方案额外利用了中高轨卫星对低轨星座进行双端管控，大幅增强了极端条件下网络的鲁棒性与灵活性。

此外，为充分保障端到端数据传输效率，卫星节点可根据网络负载情况进行星间弹性建链，然而此方法会导致网络拓扑产生剧烈变化，若将拓扑更新信息全部上注至地面或中高轨SDN控制器进行集中管理，会浪费宝

贵的星地/层间链路带宽资源。因此，可对低轨星座进行分域管理，在每个域内选取一颗LEO卫星作为域内SDN控制器，负责收集域内网络状态信息。当路由更新或节点功能重构在局部发生时，可由域内SDN控制器生成相关决策，实现服务快速响应与就近转发，从而减少网络中的频繁信令交互。此外，所有域内SDN控制器可组成SDN控制平面，周期性地交互各域信息，协助中高轨、地面控制器完成跨域管理，进一步提升卫星互联网的在轨自治能力^[34]。

2.2 巨型低轨星座构型设计方法

星座构型设计是建设低轨星座系统的基础和关键，其优劣对网络鲁棒性、有效性以及后期的运营维护难度都有着决定性作用^[35]。在进行星座构型设计时，主要可采用几何解析法或优化设计法，其中几何解析法以空间几何、轨道动力学为基础，通过研究星间拓扑几何关系来确定轨道参数，具有形式简洁、可解释性强的优点。参考文献^[36]主要考虑轨道高度、卫星数量、覆盖倍数等约束条件，基于覆盖带法，设计了一种满足全球4重覆盖的LEO卫星星座。在考虑 $J_2 \sim J_4$ 摄动影响条件下，参考文献^[37]给出回归轨道和共星下点轨迹轨道的设计方法，通过将二者结合，最终提出了所有卫星共星下点轨迹，且轨迹固定不变的星座构型设计方法。类似的，SpaceX公司以不同层星座具有相同的回归周期为依据，完成了

多层星座同步运动的构型设计, 同时该构型也能保证同层内的所有卫星具有相同的星下点轨迹。SpaceX公司透露, 将在第2期Starlink星座中采用这种设计方案。为复现Starlink的星座构型, 参考文献[38]在考虑 J_2 摄动影响条件下, 提出了类星链卫星星座轨道设计方法, 并通过仿真验证了此设计方案的正确性。此外, 当前还有研究人员提出使用随机几何建模巨型星座, 进而完成星座性能的分析与构型设计^[39-40]。图2(a)是基于轨道参数的星座建模方案, 该模型能对星座进行精准刻画, 但基于此进行星座性能分析或相关计算时, 却面临较高的计算复杂度。与之相对的, 基于二项分布(Binomial Point Process, BPP)的建模方案将卫星建模为在球面上均匀分布的点, 之后可利用随机几何对星座性能进行理论分析, 具有良好的可解释性, 如图2(b)所示。进一步考虑实际卫星分布具有高纬度密集、低纬度稀疏的不均匀特性, 有学者提出采用齐次二项分布对低轨星座进行建模, 如图2(c)所示。同时参考文献[41]利用沃瑟斯坦距离证明随星座规模增大, 基于非齐次BPP建模的卫星分布将逐渐接近真实情况, 因此可利用该方法对巨型星座性能进行分析, 从而充分降低计算开销与时间复杂度。

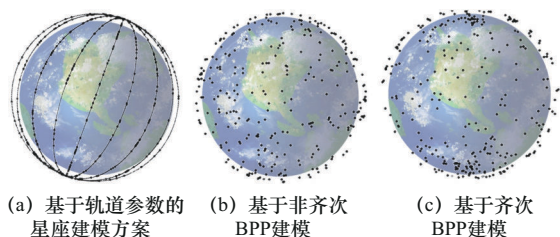


图2 卫星星座示意

与几何解析法不同, 优化设计法利用遗传算法、差分进化算法等优化方法, 搜索任务驱动下的目标函数在可行域内的最优解, 该方法在解析关系式难建立的复杂问题求解时具有性能优势, 但不具备可解释性^[37]。参考文献[42]以星座覆盖性能为优化指标, 建立了多重约束下的星座优化问题, 通过线性自适应进化算法求解该问题, 得到了最优星座设计。参考文献[43]以覆盖率、星间链路范围、仰角为优化目标, 将卫星总数、轨道高度、轨道倾角等作为成本, 设计最大效费比问题并采用遗传算法解决该问题。与参考文献[43]类似, 参考文献[44]通过遗传禁忌智能算法求解最大化效费比问题, 从而得到低轨星座最优轨道参数。

随着星座规模不断扩大, 未来巨型低轨星座将呈现跨轨混合组网特性, 不同卫星在覆盖范围、通信带宽等方面将具有异构特性, 导致优化设计法在此场景中面临搜索空间大、算法难收敛等挑战。与之相对的, 几何解析法具有低开销、易收敛的性能优势, 更适用于巨型星座构型设计; 但几何解析法通常将卫星抽象为具有相同属性的点, 无法对不同卫星在服务能力上的异构性进行精细化建模, 从而不能对星座服务能力进行充分利用。因此, 未来可考虑先利用几何解析法对轨道高度、轨道倾角等基础参数进行确立, 之后再考虑各卫星节点的差异化服务能力, 利用优化设计法对构型进行局部优化, 最终在设计开销与星座效能保障两方面实现权衡。

2.3 天地一体化的通信协议设计

考虑地面信关站难以实现全球部署, 因此利用星间链路进行星间组网, 从而充分发挥低轨卫星数据传输能力已成为业界共识。在此背景下, 设计适用于卫星网络的星间通信协议已成为巨型星座建设的关键一环。当前主流的星间通信协议可分为3种, 分别是由空间数据系统咨询委员会提出的空间通信协议规范、容迟网络协议和改进的TCP/IP协议, 各协议的协议栈架构如图3所示。其中, SCPS协议在TCP/IP模型的基础上进行改进, 形成了一套适用于深空通信的全新协议体系。受限于高昂的开发和维护成本, 目前SCPS协议族中除了支持增强代理方式的SCPS-TP协议仍在一些商用设备中使用, 其他协议已全部停止维护^[22]。DTN协议是由NASA主导研究的, 为克服星际通信中长时延、间歇性连接、高误码率等挑战而设计的星间通信协议^[45]。其最重要的特点是在应用层和传输层间引入了束层协议, 束层协议通过对数据包进行存储转发克服网络间歇性连接问题。同时, DTN还在束层下引入了汇聚层协议(Convergence Layer Protocol, CLP), 基于该协议, 束层协议可执行在各种传输层协议之上^[46]。当前, 在NASA推动下, DTN协议正在加速发展并逐步投入使用, 但该协议的相关技术尚未完全成熟, 且未经大规模网络应用验证。同时, 存储转发机制以牺牲传输时延为代价保障通信的可靠性, 更适合需要充分利用传输机会的深空稀疏组网环境, 且束层的引入额外增加了协议开销, 不利于负载受限的低轨卫星。因此, 面向飞速发展的巨型低轨星座网络, 将地面网络成熟的TCP/IP协议体系向上延伸, 形成基于TCP/IP的卫星互联网是更为可行的发展方向。

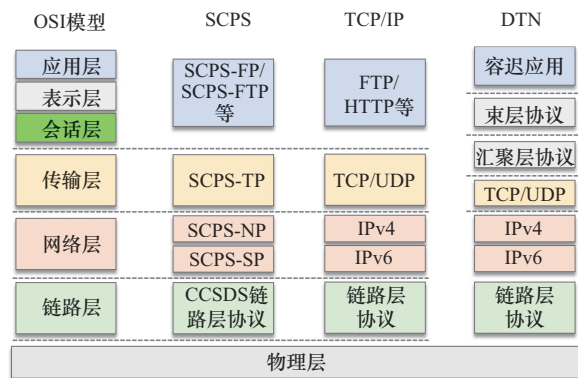


图3 OSI模型和SCPS、TCP/IP、DTN协议的协议栈架构示意

早在 1990 年, 国际互联网工程任务组 (IETF) 就已开展面向空间网络的 TCP/IP 协议栈研究^[47], 当基于 TCP/IP 协议构建天地一体化的通信网络时, 地面网络的通信协议及通信设备不必进行大规模调整^[48], 主要需根据星间传输特点对天基通信协议进行增强设计。首先, 传输层的 TCP 协议在星间通信场景下主要面临以下挑战: 第一, 星间端到端往返时延可能在 500 ms 以上^[49], 由于 TCP 是基于反馈的应答协议, 因此长反馈时延将导致其难以实现拥塞避免, 有损网络传输性能; 第二, 受太阳辐射、高能粒子、长星间链路距离以及光束追踪误差的影响, 星间链路存在高误码率及易中断等特点。由于 TCP 协议会将所有丢包归因于网络拥塞, 因此在高误码率的空间通信环境中, 其会频繁缩减发送窗口, 导致网络吞吐量显著下降, 因此如何优化传统 TCP 协议的运行参数与控制机制, 使其具有高效拥塞避免与重传能力, 同时减少应答报文产生的数量, 是一个重要研究方向。在网络层协议方面, 考虑未来巨型星座将包含上万个卫星节点, 因此可基于 IPv6 协议在网络层实现天地一体化。在数据链路层和物理层协议方面, 考虑星间激光通信具有高传输速率及大容量承载能力, 同时地面光传输网络 (Optical Transport Network, OTN) 已具备成熟产业链和规模经济优势, 因此通过对地面 OTN 协议进行剪裁优化, 形成基于星间激光通信的天基承载协议是一个可行方向^[16]。最终, 协议栈上层采用 TCP/IP 协议, 下层利用剪裁后的星载 OTN 协议, 即可完成扩展性强、带宽大、灵活可用的天地一体化的全光通信网协议栈构建。

2.4 巨型低轨星座天地一体化的编址方法

利用编址技术可为网络中所有节点分配逻辑地址, 从而可对任意节点进行寻址, 并基于此实现路由转发。在地面网络中, 网络编址通常是基于地理位置进行的, 若将此方案直接应用于卫星网络, 卫星的高速移动将导

致其与不同地面自治系统互联, 从而产生频繁的 IP 地址变化。这不仅会产生大量的信令通告, 消耗网络带宽资源, 还会严重恶化路由收敛速度^[50]。因此, 有学者提出可基于相对参考系进行编址, 将 IP 地址与预设区域绑定, 当卫星运动到某区域时则具有该区域的 IP 地址, 实现编址寻址与卫星移动性相解耦。如可将地表按经纬度划分为多个区域, 每个区域基于地理位置信息进行 IP 地址编址, 最终形成一个虚拟静态网络, 网络寻址可基于此虚拟拓扑完成。在分配 IP 地址时, 地面用户可根据自身地理位置获取接入 IP 地址, 卫星则在进入不同区域时对自身 IP 进行更新。由于该方案中的子网划分与 IP 地址分配都是按地理位置进行的, 因此即使地面用户的接入卫星发生变化, 其也无须更新自己的 IP 地址^[51]。该方案的缺点在于卫星变化 IP 地址后需对自身的路由表进行更新, 给控制平面带来了较大的不稳定性^[52]。为解决卫星路由表频繁调整问题, 参考文献^[53]提出了基于卫星逻辑位置的编址方案。该方案根据卫星编号或卫星所处轨道及其在轨道内的位置, 为卫星设置恒定不变的 IP 地址。当地面用户改变接入卫星时会使其 IP 地址发生变化, 从而频繁触发绑定更新, 大量消耗星上通信资源, 同时新的连接关系也需通过泛洪来使路由重新收敛^[51]。

面向卫星互联网发展趋势, 可基于 IPv6 完成天地一体化的编址方案设计。其中地面用户继续沿用基于地理位置的编址策略, 卫星侧则采用双层编址方案, 在保证与地面兼容的同时尽量减少由卫星运动引发的 IP 地址和路由表更新。具体的, 内层采用基于卫星逻辑位置的编址策略, 当数据在星间转发时, 其仅需根据目的卫星编号即可查找下一跳路由。此时内层也无须使用完整的 IPv6 地址, 可充分降低控制平面的存储、计算和带宽资源消耗, 有助于实现轻量化星间路由。而外层采用基于地理位置信息的编址方案, 使地面用户 IP 地址不随接入卫星变化而频繁变动, 同时还可构建天地一体化的虚拟静态拓扑, 减少地面用户寻址开销。

2.5 巨型低轨星座星间建链方法

利用星间链路进行星间组网, 是实现大空间尺度下数据低时延快速传输的关键手段, 通常可基于“一星四链”结构或采用优化算法来完成星间网络构建。基于“一星四链”的星间建链模式如图 4 (a) 所示, 当基于此方法进行星间组网时, 每颗卫星会与同轨道前后两颗卫星, 以及左右相邻轨道的两颗卫星建立 4 条永久星间链路, 最终形成规则的“网格网络”, 目前主流的 Iridium 和 Starlink 星座都是通过这种方式完成星间组网的^[54]。这种组网模式对收发机性能要求低, 同时也具有拓扑稳定的

性能优势^[55]。在未来巨型星座中, 此类组网模式将导致极高的端到端路由转发跳数, 同时随着卫星网络承载的业务流量与日俱增, 过多的星上转发跳数会导致额外的排队时延^[56], 从而恶化网络传输效率^[57-59]。因此, 为充分发挥巨型星座网络传输能力, 参考文献^[55]在“一星四链”结构的基础上, 在相邻两个运动方向不同的卫星间额外引入一条“网格间链路”, 该链路如图4(b)所示。两颗卫星间剧烈的相对运动导致此类链路较难维持, 但引入该链路却能显著降低端到端通信时延。与之类似, 参考文献^[60]在“一星四链”组网结构基础上, 进一步考虑链路距离、链路建立时间、链路切换频率等约束条件, 以最大化拓扑持续时间为目标, 基于最大匹配原则完成“网格间链路”分配, 最终在拓扑动态性和网络时延性能间实现权衡。

此外, 有学者还基于优化思想对星间建链方法展开进一步研究。参考文献^[25]着重考虑双层星座网络下层网链路建立方法, 当层间链路分别采用激光和微波频段时, 以最大化网络传输效率和最小化拓扑快照数量为目标, 基于优化理论和星座几何特征, 对层间链路建链方法进行设计。参考文献^[61]在考虑大规模星座星间干扰的情况下, 以最大化星座传输速率为目标, 利用贪婪算法得到了星间链路建链与资源分配方法。参考文献^[62]以最小化网络能耗为目标, 通过考虑上一时刻拓扑结构, 提出基于马尔可夫过程的星间链路建链方法, 并通过仿真证明虽然所提方案在网络能耗方面与传统算法相当, 但其可大幅缩小算法执行时间并降低计算开销。

上述研究仅从优化星座网络自身的传输性能角度进行星间建链方案设计, 未能将地面真实的流量需求进行

联合考虑。实际上, 地面用户流量需求具有空时不均的分布特点, 通过动态调整星间建链模式, 可以使均匀分布的卫星星座更好地服务于不均匀的地面流量需求, 从而进一步优化卫星网络传输性能。基于这种考虑, 参考文献^[26]根据地面互联网的流量特征, 将卫星分为骨干卫星和接入卫星, 通过按需动态建链降低网络平均端到端路由跳数, 提升网络效率。类似的, 参考文献^[63]提出了一种基于用户分布驱动的星间建链方法, 实现动态拓扑条件下的弹性联网, 降低网络路由跳数的同时, 提高网络整体容量和利用率。

在巨型低轨星座中, 每颗卫星可视范围内的其他卫星数量可有数十颗^[24], 这虽然提升了星间建链的冗余度和灵活性, 但也导致在执行全局优化建链算法时面临极大的计算开销, 因此可继续沿用图1中的分域思想进行星间建链方法设计。其中, 在同层星座内, 可令每个自治域的SDN控制器联合域内星上负载状态及对应的地面流量需求, 实现域内自主、弹性建链。在层间链路设计方面, 应综合考虑网络传输效率与链路持续时间, 在保证大空间尺度传输性能的同时, 尽量减小链路通断频率。因此可采用激光-微波协作组网模式, 在用户热点区域利用激光层间链路提供大带宽传输能力, 而在恶劣通信环境或低负载区域, 可使用微波建立层间链路, 此方法不但能降低层间链路维持难度, 还能在网络传输性能提供下限保障。

2.6 巨型低轨星座拓扑表征方法

低轨卫星的高速运动导致星间/星地链路面临频繁断开与重建, 通常可利用拓扑表征屏蔽星座动态特性, 之后即可在静态拓扑序列上进行路由计算等相关操作。当

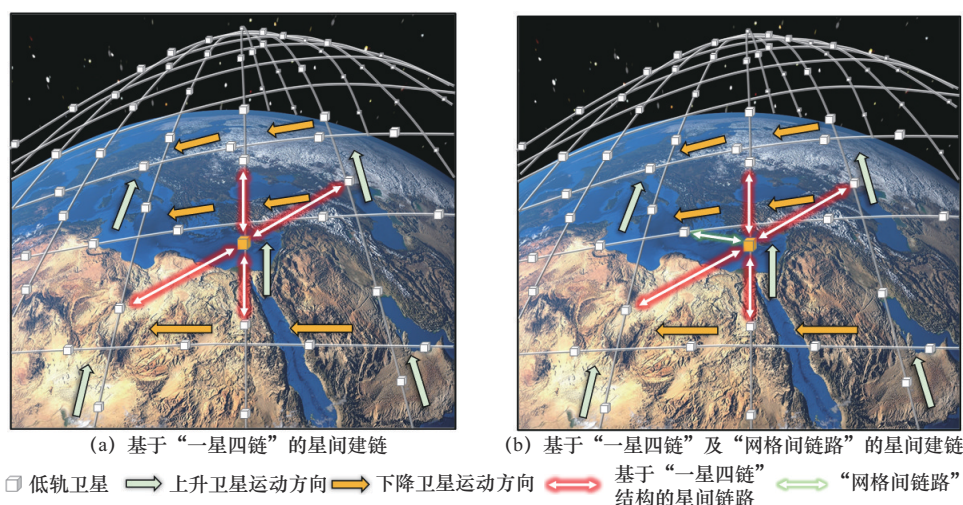


图4 “一星四链”结构与“网格间链路”示意

前,常用的拓扑表征方法大都是基于虚拟节点或虚拟拓扑法设计的。

虚拟节点法最初由Mauger等^[64]提出,后来经Ekici等^[65]推广并大量用于低轨星座分布式路由算法设计中,虚拟节点法的原理如图5所示。该方法的基本思想是利用卫星逻辑位置概念,将地面网络划分为若干区域,每个区域与一个虚拟卫星节点对应,该虚拟节点为此区域提供通信服务。该方法可将卫星网络视为由虚拟节点构成的固定静态拓扑,从而有效屏蔽卫星动态特性。基于该模型,用户根据自身地理位置即可推知其服务卫星的虚拟地址,从而地面用户可通过与虚拟节点绑定实现移动性管理。随着星座规模增大,可能出现多颗卫星同时覆盖同一虚拟节点的情况,因此参考文献^[66]对该问题进行了讨论,并进一步提出多状态虚拟节点法。基于虚拟节点的设计思路,参考文献^[67]通过划分天球表面得到一系列虚拟节点,卫星通过与天球表面上的虚拟节点绑定来屏蔽卫星动态性。该方法无法有效应对星地动态特性,用户接入卫星时需根据星历对其服务卫星进行计算,但该模型的优势在于卫星天线可工作在卫星固定足印模式下,对天线性能的要求得以降低。

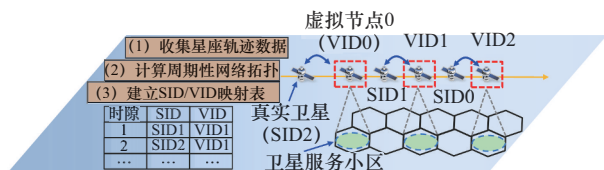


图5 虚拟节点法原理示意

虚拟拓扑法利用星座拓扑的可预测性将系统周期划分为若干时间片 $[t_0, t_1], [t_1, t_2], \dots, [t_{n-1}, t_n]$,从而形成快照序列图。在每个快照内可认为网络拓扑保持不变,拓扑变化仅在 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 时刻发生^[68-70]。虽然快照序列图可便捷地屏蔽星座拓扑动态特性,但其仅能刻画快照内的拓扑连接情况,忽略了快照间的联系,因此无法保证端到端路由路径在大时间尺度下的连续性,同时该模型无法对存储、计算等资源进行联合表征。为解决此问题,有学者在快照序列图模型的基础上进一步提出了时间扩展图模型。该模型通过引入存储链路将各快照联系起来,实现对时变网络中通信和存储资源的联合表征^[71-72]。此外,随着SDN和NFV技术的不断发展,未来卫星节点可被部署多个不同的虚拟网络功能,然而时间扩展图只能对节点上的单一计算资源进行体现,无法适配未来多维资源融合的卫星网络发展趋势。因此,有学者基于时间

扩展图进一步设计多功能时间扩展图,将具有多个计算功能的节点分解为一个虚拟子节点、多个虚拟功能节点和虚拟传输链路。多功能时间扩展如图6所示,其中虚拟子节点只起中继作用,每个虚拟功能节点都可提供不同的计算能力,虚拟传输链路则将虚拟子节点和虚拟功能节点相连接^[73]。最终,多功能时间扩展图不但能对网络中的通信、存储资源进行联合表征,还能进一步刻画节点具有的多种计算能力,适用于任务流在同一节点接受多个计算功能的软定义空间通信场景^[74-75]。随着星座规模的不断增加,庞大的卫星节点数量和复杂的星间连接关系将导致此类图模型的维度急剧上升,这不但会产生大量存储开销,还会使基于此类模型的问题求解面临极高的时间复杂度。

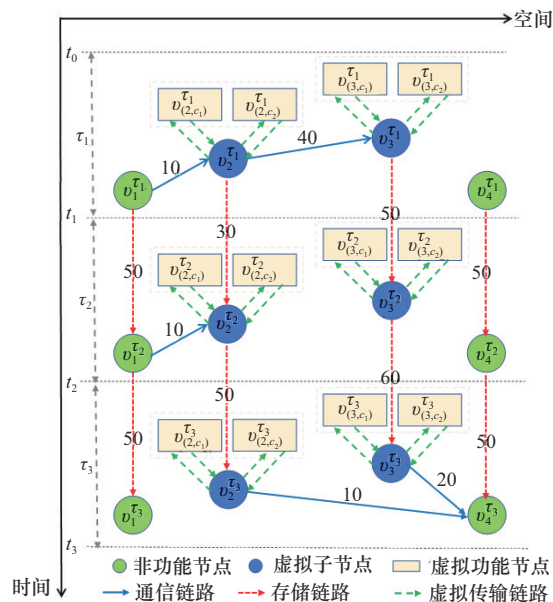


图6 多功能时间扩展

面向低轨星座巨型化发展趋势,可基于图1中的分域管控思路设计拓扑表征方法。首先,考虑域间/层间链路具有较强的动态特性,同时当连接关系发生改变时,对应链路的存储资源也会产生较大变动,因此可将不同低轨卫星自治域及中高轨卫星抽象为上层节点,基于多功能时间扩展图对域间、层间链路的连接关系、持续情况与存储资源等进行表征。与之不同的,域内卫星间的相对位置关系波动较小,其链路连接关系及节点的计算存储资源相对较为稳定,因此可利用虚拟节点法对域内拓扑进行刻画,并基于此进一步设计分布式路由方案完成域内路由转发。当数据包被转发至自治域的边缘节点时,再基于时间扩展图对后续域间/层间路径进行规划。如此不但能降低星座拓

扑表征模型维度,减轻存储开销,同时在进行端到端路由规划时,也可充分降低计算开销与时间复杂度。

2.7 巨型低轨星座路由技术

路由技术是保障用户数据在卫星网络中高效传输的基础,是卫星互联网中的重要研究方向。由于低轨卫星网络具有拓扑变化频繁、单跳链路传播时延长、单星资源受限等特点,因此地面网络中成熟的路由协议不再适用,如何设计适用于低轨星座的路由算法已成为研究热点。

当前,低轨星座路由算法可分为单层星座路由算法和多层星座路由算法。各路由算法的对比见表1。在单层星座路由算法设计方面,早期主要采用面向连接的思路

进行设计^[76]。参考文献[77]将ATM网络的路由概念首次引入卫星网络,其主要利用虚拟拓扑法将动态卫星网络离散化为一系列静态快照,之后根据优化目标在静态拓扑中选取最优路由路径。参考文献[78]利用排队论预测链路的排队时延,将排队时延与传播时延之和作为链路权重,在虚拟拓扑上使用Dijkstra算法生成端到端最短路由路径。参考文献[79]将LEO卫星网络拓扑建模为一系列等长时间的有限状态自动机,利用卫星之间的可视性建立每个状态的可视矩阵,然后根据流量需求计算最优链路分配机制,实现有限链路资源的充分利用。此类面向连接的路由算法一般采用离线集中计算方式得到静态路由表,具有操作难度低、路由表易配置的性能优势,在

表1 路由算法对比

适用星座	算法类型		算法名称	算法原理与优势	算法不足
单层星座	面向连接的集中式静态路由		DT-DVTR ^[77]	路由配置简单,开销小,可根据不同优化目标选取路由路径	缺乏对流量拥塞以及卫星失效的快速响应能力
			DT-DVTR ^[78]		
			FSA-BR ^[79]		
	基于IP的路由	VN+分布式	OPSPF ^[80]	利用拓扑先验信息降低路由计算复杂度,同时可针对网络环境进行动态路由调整	泛洪机制在大规模星座下将产生大量信令开销,同时没有对星上负载进行充分考虑
		VN+分布式	DRA ^[81]	基于最小跳数完成转发,无须星上存储路由表,路由开销极小	仅考虑当前卫星节点队列的排队情况,不利于实现负载均衡
	面向无连接的动态路由	负载均衡路由	VT+集中式+分布式	LRES ^[82]	在大规模星座下网络泛洪会产生较大信令开销,消耗拥塞区域的带宽资源
			VT+集中式+分布式	QSDR ^[83]	集中计算路由表和全网泛洪机制在大规模星座下面临较高的计算复杂度与信令开销
			VN+集中式+分布式	STCR ^[56]	缺乏对网络全局信息的收集,导致路由决策缺乏一定的全局最优性
		QoS保障路由	VT+集中式	MSR-RP ^[84]	随着星座规模与业务种类增加,集中配置将使算法复杂度与灵活性不足
			VT+集中式+分布式	TCDR ^[85]	控制节点收集全网链路状态信息将产生较大信令开销,同时算法复杂度较高,扩展性差
多层星座	面向无连接的动态路由	基于IP的路由	VT+集中式	SGRP ^[86]	MEO卫星为其覆盖的所有LEO卫星计算路由表,在大规模星座下算法开销大、难收敛
		负载均衡路由	VT+集中式	HQRP ^[87]	方案针对静态拓扑设计,大规模星座拓扑存在剧烈变化,方案的扩展性难保障
		QoS保障路由	VT+集中式	HDRP ^[88]	大规模星座下MEO与LEO卫星间的连接关系频繁变化,该方案面临较大存储与计算开销

注:表中的VT指虚拟拓扑法,VN指虚拟节点法。

早期小规模、低负载的低轨星座路由场景中有良好表现。随着互联网的迅速推广,卫星网络中承载的业务流量飞速提升,由于此类路由算法缺乏对流量拥塞以及卫星失效的快速响应能力,因此面向无连接的路由算法开始得到广泛应用。

面向无连接的路由算法可根据其设计原则进一步分类。第一类为基于IP的路由技术。参考文献[80]设计了一种面向无连接的分布式路由算法,利用虚拟节点法构建虚拟静态网络拓扑,并通过全网泛洪解决非规则拓扑变化,当链路状态与静态拓扑相符时使用静态路由,否则使用动态路由。在巨型星座下,该方案的全网泛洪机制将产生大量信令开销,同时没有充分考虑卫星负载与链路的排队情况,不利于降低端到端通信时延。在参考文献[81]中,用户首先根据当前节点和目的节点的坐标关系,判断转发方向,之后基于端到端最小跳数完成路由转发,并通过仿真验证该方案与Dijkstra算法在传播时延上性能相当。第二类为负载均衡路由算法。参考文献[82]提出分布式路由算法LRES,通过将链路传播时延和统计的排队时延作为链路权重,为业务计算 k 条端到端最短路径。同时,进一步设计低开销的链路负载通知机制,当链路出现拥塞时,节点可将链路拥塞情况下发至下游节点,下游节点通过向备选路径转发数据包来避免拥塞并实现负载均衡。为解决基于统计方法预测的链路排队时延无法反映链路实时负载状态的问题,参考文献[83]对链路的长期平均排队时延和短时排队时延进行加权,得到链路排队时延估计模型。之后基于虚拟拓扑法,在每个快照开始时刻利用上述模型预测各链路排队情况,将链路传播时延和预期排队时延之和作为权重,采用Dijkstra算法得到端到端最优和次优路由路径。最后,路径中的各节点基于实时负载情况完成分布式路由转发。当卫星数量达到上千颗时,利用Dijkstra算法进行全局路径计算将面临较长的收敛时间,对该方案的可行性带来较大影响。为解决大规模低轨星座下路由算法复杂度高、端到端路由跳数大、传输时延长的问题,参考文献[56]提出分布式星地协同路由方法。在该方法中,源节点首先利用端到端最小跳数估计算法得到路由方向与路由跳数约束,在该约束下,各节点通过联合考虑各方向剩余跳数、当前链路负载与下一跳卫星负载进行分布式路由转发,并通过仿真证明所提方案可显著降低端到端时延并提升系统吞吐量。第三类为面向业务特定QoS需求的路由策略。参考文献[84]通过划分区域提出MSR-RP路由算法,该方案在低负载区路由计算不区分业务类型,根据业务权重

动态调整链路代价;在高负载区使用遗传算法计算路由,以最大化网络吞吐量和负载均衡指数为目标设计适应度函数,将不同业务的QoS指标作为约束条件,由控制中心统一计算高负载区每颗卫星不同类型业务的路由路径,在实现良好的负载均衡的同时为多种业务提供QoS保障。参考文献[85]将业务分为3类,其中A类表示以最小化端到端时延为目标的交互式实时数据传输类业务,B类是以最大化吞吐量为目标的文件传输类业务,C类则是尽力而为传输类业务,其无特定的QoS需求;基于业务分类,采用不同优化指标进行端到端路由路径规划,并通过仿真证明与不区分业务类型的路由策略相比,所提方案在平均端到端时延、网络吞吐量和链路负载等方面都具有性能优势。

与单层星座相比,多层星座的网络拓扑具有更强的动态特性,因此适用于多层星座的路由算法大多是面向无连接的。参考文献[86]考虑MEO-LEO双层星座架构,基于虚拟拓扑法将双层星座转换为静态网络,MEO卫星负责收集其覆盖区域内所有LEO卫星间的链路状态信息,并以最小化端到端时延为目标计算任意LEO卫星到其他所有LEO卫星的路由路径,并通过路由聚合缩小路由表规模。当路由计算结束后,MEO卫星再将计算结果下发至LEO卫星。与单层星座路由方案相比,所提双层星座路由方案可显著降低端到端平均时延。随着星座规模增大,该方法将面临较大的存储开销,同时算法的收敛速度难以保障。为实现双层星座网络下的负载均衡,参考文献[87]以最大化最小链路剩余带宽为目标规划业务路由路径;同时为降低数据传输导致的网络资源消耗,还对路由跳数加以限制,当路由跳数超过阈值时,选择上层MEO网络进行数据传输,当业务传输距离较近时则选择LEO层进行数据传输。此外,为减少双层星座网络的拓扑快照数量,参考文献[88]首先对虚拟拓扑法进行优化设计,之后在每个快照开始前,MEO卫星基于收集的覆盖区域内LEO卫星间的链路信息,以最小化端到端时延为目标计算路由路径,并将计算结果下发至LEO节点;同时,在计算过程中还充分考虑链路带宽约束,当路径中的链路不满足带宽约束时,则为该业务计算次优路由路径。

面向未来巨型低轨星座多层、异构的组网趋势,当前路由算法大都存在资源开销大、算法复杂度高、路由收敛难等问题,因而可继续沿用图1的分域思想,设计跨域协同的低开销、低复杂度、轻量化路由算法。首先可采用虚拟节点法完成域内拓扑表征,同时考虑地面负载

情况,在域内进行拓扑-路由联合优化,从而形成稳定的域内路由表。由于层间链路的连接关系存在频繁变化,为降低拓扑管理开销,可根据链路时延、带宽等因素对域间(包括层间)链路进行聚合,将相邻区域的多条域间链路用抽象的聚合链路表示。之后以域内虚拟拓扑和域间聚合链路构建一系列拓扑快照,根据源-目的节点位置,即可形成端到端域间路由规划。该方案利用虚拟节点刻画域内拓扑,利用虚拟拓扑法刻画域间连接关系,不但减小了快照维度,还能大幅降低网络快照数量。此外,分别对域内、域间路由进行规划,可大幅降低计算开销,同时将路由表拆分为域内、域间两部分也能进一步缩小路由表规模,降低网络存储资源消耗。

2.8 巨型低轨星座故障恢复策略

由于卫星长期工作在开放的空间环境下,受电磁、热、日凌、高能粒子等复杂空间环境的不断影响,卫星系统极易出现部件损伤。此外,在军事打击等极端条件下,卫星节点失效将更为常见^[89]。由于低轨卫星通常运行在高度500 km以上的轨道中,存在故障修复成本高、耗时长等问题,因此如何设计故障恢复策略,降低由卫星故障导致的网络通信能力恶化是一个重要研究方向。

通常,卫星故障恢复可通过补网发射、星座冗余设计、链路重建或替代路径4种方式实现。其中,补网发射是指在原星座卫星故障后,通过重新发射新卫星来保障网络通信能力。参考文献[90]给出了一种导航星座系统补网方法,该方法通过对卫星轨道转移进行燃料和时间的综合优化,得到快速补网轨道转移模型,完成导航星座补网与备份。此类方案需要经历轨道设计、卫星发射和正式部署3个阶段,耗时长且成本较高,因此很少被用作卫星故障恢复手段。与补网发射类似,有学者指出可在星座中部署冗余卫星,利用冗余卫星快速填补由卫星故障导致的网络空洞,省去补网发射策略中的卫星发射和部署环节,提升故障恢复效率。该方案在故障卫星数量少时能取得较大收益,但随着故障卫星数量提升,一味增加星座中的冗余卫星数量将大幅提高卫星网络建网成本,也提升了网络管理难度,因此不适用于大规模低轨星座网络。

由于补网发射和星座冗余设计两种方案实现难度较高且面临较大代价,因此星间链路重建与替代路径成为了当前卫星故障恢复的主流手段。当由卫星节点故障导致以该卫星为端点的星间链路出现部分或全部失效时,可以采用星间链路重建手段避免链路失效给网络通信能力带来的不利影响。当前常见的链路重建原则有3种,分

别为距离原则(选择重建后时延小的链路)、时间原则(选择重建后持续时间长的链路)和资源原则(使重建后各卫星负载均衡)。参考文献[91]从资源原则出发,首先在每个拓扑快照内统计拓扑中所有度数未满足的卫星节点,之后以星间链路最大长度为约束,计算这些节点的所有可连接链路。最后计算网络中业务端到端最短路径经过各可连接链路的次数,按次数从高到低排序并结合节点度数限制完成链路重建。参考文献[92]从节点资源和链路时延两方面出发进行星间链路重构,在保证卫星节点具有最大连接度的同时,最大化利用卫星上资源。

有学者指出,虽然链路重建策略能有效解决卫星网络中的故障问题,但重构星间链路将消耗有限的星载资源,同时该方案会对网络拓扑造成较大影响,从而引发频繁的路由重收敛。与之相对的,基于替代路径的故障恢复策略通过局部路由绕过故障节点或链路,进而保障网络通信能力,具有资源消耗少、方案易实现等性能优势。参考文献[93]借鉴地面网络的洪泛思想来解决星间链路故障问题,即当两个卫星节点间的链路发生故障而导致下一跳路由不可达时,当前节点利用向邻居节点不断泛洪的方式找到一条可行路径,实现对故障链路的绕行。面向卫星节点失效问题,参考文献[94]提出一种基于有限状态自动机的低轨卫星网络动态错误容忍路由算法。当卫星节点失效时,该算法会以故障卫星和其相邻卫星为基础,构建故障块。当有数据包要经过故障块时,根据目的节点与当前节点的相对位置,利用边界扩散法为数据包寻找一条沿故障块边界的替代路径,从而完成故障避免。

未来巨型低轨星座通常蕴含上万个卫星节点,且复杂的层内、层间链路连接关系给卫星网络故障恢复带来巨大挑战,传统算法在这类高维度的复杂拓扑下将面临极高的计算开销,难以保障故障恢复效率。为实现快速高效的卫星故障恢复,可考虑引入人工智能技术,以网络状态信息为输入,对网络故障区域快速进行精准定位,之后按恢复的紧急程度对故障区域进行排序,在各区域可根据其故障情况调用链路重构、路由重规划等不同恢复手段,最终实现网络可靠高效恢复。

2.9 巨型低轨星座服务质量保障技术

随着大容量星间链路的逐步应用,利用低轨星座网络承载高密度的地面流量已成为未来重要发展趋势。地面网络业务种类繁多,不同业务在传输时延、带宽、丢包率等方面具有不同要求^[95]。因此,如何在高度动态的卫星网络中保障业务差异化的QoS需求成为了一大研究

热点。

从链路层角度看,可首先采用优先级队列对数据包进行优先级划分,之后进一步与轮询调度、加权公平调度等队列调度技术相结合,通过规划数据包的转发时隙,保障业务 QoS 需求。参考文献[96]基于优先级队列和时间敏感网络中的循环排队和转发(Cyclic Queuing and Forwarding, CQF)机制,重新定义了一种可用于低轨卫星网络的循环优先级和转发(Cyclic Priority and Forwarding, CPF)策略,CPF 不但可消除 CQF 对传输时间敏感流的带宽限制,同时与现有机制相比,该策略还可将网络丢包率降低一个数量级,同时使服务超时率降低 70%。从网络层角度看,以业务差异化 QoS 需求为优化目标规划路由路径,也是实现服务质量保障的可行方案。参考文献[97]将端到端时延、时延抖动、剩余带宽作为多 QoS 优化目标,利用蚁群算法为各业务求解满足时延与负载均衡约束下代价最小的路由路径。考虑基于 SDN 的组网模式已成为未来发展趋势,参考文献[98]基于 SDN 架构,建立链路稳定度函数、链路负载度函数和链路代价函数,通过调节权重因子计算满足业务 QoS 要求的路由路径,完成服务质量保障。从传输层角度看,可利用多径调度和冗余传输策略保障业务带宽和丢包率需求。参考文献[99]开发了一种具有确定性时空路由、冗余编码和多径调度的确定性卫星网络传输方法,该方法首先利用星历表信息和动态资源更新机制预测即将到来的通信机会,之后通过构建确定性时空路由保障业务传输时延,并利用稀疏和冗余网络编码机制确保数据可靠传输。参考文献[100]通过综合考虑业务可用传输路径和卫星网络不均匀的流量密度,利用图神经网络为业务选择多径进行传输,并通过仿真验证该方案可显著降低业务传输时延,提升网络吞吐量与业务完成率。从更宏观的角度来看,基于 SDN 和 NFV 技术,将 5G 中的网络切片方案延伸至卫星网络,为业务设计定制化传输方案,是实现服务质量保障的有力手段^[101]。

除上述技术外,构建天地一体化确定性网络,打破传统“尽力而为”的僵化服务模式,已成为实现服务质量保障的重要方向。当前,各组织已积极开展相关的标准和技术推进工作。如在 MAC 层以下采用 FlexE 技术实现业务的管道隔离,解决同一管道内的流量抢占问题;在链路层使用 IEEE 802.1Qat 协议、IEEE 802.1Qcc 协议完成资源预留,使用 IEEE 802.1Qbv、IEEE 802.1Qch 等协议进行流量整形,从而实现业务流的实时传送;在网络层利用 DetNet 技术,通过集中式路由路径设置完成业务

确定性传输^[102-103]。在未来基于巨型星座的天地一体化组网模式下,海量节点个数与复杂多变的连接关系将为全域全场景用户需求感知、天地一体化端到端网络切片编排以及全域资源协同分配带来全新挑战。因此,可考虑利用人工智能技术完成复杂网络下网络信息收集与用户需求的快速感知,利用感知信息辅助实现星地端到端智能切片编排,在各切片内设计模型与数据驱动的资源智能分配技术,通过与上述队列、路由、传输技术的充分融合,实现全域网络资源的按需确定性调度,满足卫星互联网各类用户的极致服务需求。

2.10 巨型低轨星座仿真平台设计

低轨星座网络仿真平台架构如图 7 所示,包括参数配置、卫星运动模拟、网络仿真内核等多个模块,通过物理层建模、业务流量生成、拓扑模拟、网络协议设计等,完成各种条件下系统在时延、带宽利用率等方面的性能评估。在卫星实际发射前利用仿真平台对网络性能进行测试,可充分发现系统中的潜在问题,降低部署风险。同时通过仿真平台,开发人员可进行方案快速验证与技术迭代,从而缩短开发周期,提升研发效率。

当前常用的卫星运动模拟器有 STK、GMAT、Orekit、FreeFlyer 等,此类软件通常用于模拟卫星轨道及其运动行为,同时还可利用可视化界面对星座构型、卫星姿态、星间链路连接情况进行直观观察。此类软件不能模拟数据包级别的网络行为,缺乏对星间、星地以及地面网络节点之间通信过程的仿真能力,因此其必须与网络仿真软件联合使用。通常,可先基于 STK 获取星座拓扑动态特征(包括链路距离、衰减、连接情况等),再将其映射至网络仿真软件中来模拟卫星星座动态特性^[104],之后结合具体协议即可在网络仿真软件中完成数据包级别的端到端通信仿真。当前主流的网络仿真软件有 OPNET、QualNet、NS2/NS3、Mininet 和 OMNET++ 等,此类仿真软件通过模拟路由决策、数据包传输、网络拥塞等事件得到网络通信性能,参考文献[28]和参考文献[105]已对其特点与区别进行了详细总结。

当前,基于上述软件,已有大量研究团队开始推进低轨星座网络仿真平台的搭建工作。北京邮电大学刘韵洁院士团队于 2018 年基于 QualNet 搭建了包含 48 颗低轨卫星的网络仿真平台,并在其中完成 OPSPF 和常规路由算法的性能仿真,并对算法的收敛时间、端到端通信时延与丢包率等性能指标进行评估。中国空间技术研究院于 2021 年基于 FPGA 搭建了卫星网络仿真平台,利用该平台对 SATNET-OSPF 和传统 OSPF 路由算法的性能进行

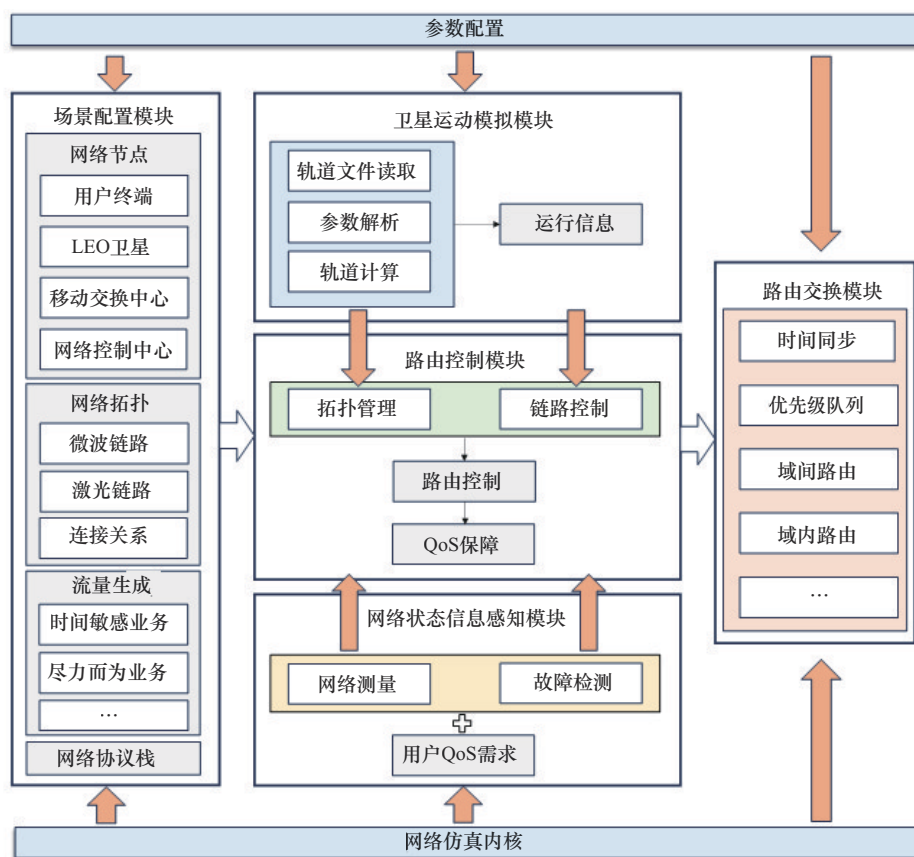


图7 低轨星座网络仿真平台架构

比较,并对通信开销、路由收敛时间等关键参数进行分析^[106]。

上述平台大多针对小规模星座设计,在未来巨型异构低轨星座网络中,将面临仿真时间长、计算开销大、功能难扩展等问题,因此需针对巨型星座设计效率更高、可扩展性更强的网络仿真平台。当前, Lai等^[107]利用 Mininet 模拟虚拟网络和虚拟路由器,使用 STK 模拟星间链路,最终搭建空间网络仿真平台 StarPerf。该平台属于非离散时间仿真系统,具有可扩展性强的性能优势,同时还支持 SDN 技术,适用于未来大规模星座仿真场景。此外,北京邮电大学张平院士团队与鹏程实验室共同搭建超大规模卫星网络仿真系统,通过联合运用分布式高效计算与事件仿真技术,实现 3 万多颗卫星网络秒级生成, 15 min 内 2 万颗卫星网络 24 h 轨道预测,同时还支持 2 万个卫星节点端到端路由仿真与性能评估。与传统仿真平台相比,该平台的仿真效率提升 8 倍以上。在当前仿真平台研制基础上,未来可考虑利用虚拟化和容器化技术构建大规模虚拟集群模拟海量卫星,并实现功能按需加载与基于数据驱动的高动态链路模拟。同时还

可加载真实网络协议栈,通过虚实结合方法与真实卫星级联进行半实物仿真,使仿真结果更贴近实际,实现以仿真平台推演空间网络姿态,完成低开销巨型星座大规模试验验证。

参考文献

- [1] IMT Vision. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond M Series Mobile, radiodetermination, amateur and related satellite services[R]. 2023.
- [2] 中移智库. 面向 6G 的天地一体融合网络技术白皮书[R]. 2024. China Mobile Think Tank. 6G-oriented white paper on integration of heaven and earth network technology[R]. 2024.
- [3] 孙耀华, 许宏涛, 彭木根. 手机直连低轨卫星通信: 架构、关键技术和未来展望[J]. 移动通信, 2024, 48(1): 103-110. SUN Y H, XU H T, PENG M G. Direct-to-mobile low earth orbit satellite communication: architecture, key technologies, and future perspective[J]. Mobile Communications, 2024, 48(1): 103-110.
- [4] SUN Y H, PENG M G, ZHANG S J, et al. Integrated satellite-terrestrial networks: architectures, key techniques, and experimental progress[J]. IEEE Network, 2022, 36(6): 191-198.
- [5] IMT-2030(6G)推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书[R].

- 2021.
- IMT-2030(6G) Promotion Group. 6G white paper on overall vision and potential key technologies[R]. 2021.
- [6] 赵艳宾, 王任宁, 胡培培. 一种 MEO 星座的覆盖性能及组网方案分析[J]. 电信科学, 2022, 38(4): 70-76.
- ZHAO Y B, WANG R N, HU P P. Analysis on the coverage performance and networking scheme of an MEO constellation[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(4): 70-76.
- [7] 吴炆, 胡谷雨, 金凤林, 等. 卫星网络组网关键技术[J]. 指挥控制与仿真, 2022, 44(2): 88-100.
- WU Y, HU G Y, JIN F L, et al. Key technologies of satellite networks[J]. Command Control & Simulation, 2022, 44(2): 88-100.
- [8] 周兵, 刘红军. 国外新兴商业低轨卫星通信星座发展述评[J]. 电讯技术, 2018, 58(9): 1108-1114.
- ZHOU B, LIU H J. Development review of foreign emerging commercial LEO satellite communication (SATCOM) constellations [J]. Telecommunication Engineering, 2018, 58(9): 1108-1114.
- [9] JAEJOO L, RICHARD K, JASON T. Good technology, bad management: a case study of the satellite phone industry[J]. Journal of Information Technology Management, 2005, 16(11): 48-55.
- [10] FINKELSTEIN S, SANFORD S H. Learning from corporate mistakes: The rise and fall of Iridium[J]. Organizational Dynamics, 2000, 29(2): 138-148.
- [11] 邹明, 赵子骏, 魏凡. 新兴低轨卫星通信星座发展前景研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(12): 1155-1162.
- ZOU M, ZHAO Z J, WEI F. Research on the development prospect of emerging low earth orbit satellite communication constellations[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15(12): 1155-1162.
- [12] 孙耀华, 彭木根. 面向手机直连的低轨卫星通信: 关键技术、发展现状与未来展望[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 25-36.
- SUN Y H, PENG M G. Low earth orbit satellite communication supporting direct connection with mobile phones: key technologies, recent progress and future directions[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 25-36.
- [13] PACHLER N, DEL PORTILLO I, CRAWLEY E F, et al. An updated comparison of four low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[C]//Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-7.
- [14] ZHU J F, SUN Y H, PENG M G. Beam management in low earth orbit satellite networks with random traffic arrival and time-varying topology[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(9): 13352-13367.
- [15] YUAN S, SUN Y H, PENG M G, et al. Joint beam direction control and radio resource allocation in dynamic multi-beam LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(6): 8222-8237.
- [16] 陈山枝, 范志文, 金家德, 等. 卫星互联网星间激光通信的分析及建议[J]. 电信科学, 2024, 40(2): 1-10.
- CHEN S Z, FAN Z W, JIN J D, et al. Analysis and suggestions on inter-satellite laser communication of satellite Internet[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(2): 1-10.
- [17] 李锐, 林宝军, 刘迎春, 等. 激光星间链路发展综述: 现状、趋势、展望[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(3): 133-147.
- LI R, LIN B J, LIU Y C, et al. Review on laser intersatellite link: current status, trends, and prospects[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(3): 133-147.
- [18] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议[J]. 电信科学, 2020, 36(6): 1-13.
- CHEN S Z. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 1-13.
- [19] 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(1): 2-13.
- ZHANG J X, CHANG Z Y, ZHANG Y L, et al. Survey on routing technology of mega constellation[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(1): 2-13.
- [20] 赵亚飞, 闫冰, 孙耀华, 等. 低轨星座通导一体化: 现状、机遇和挑战[J]. 电信科学, 2023, 39(5): 90-100.
- ZHAO Y F, YAN B, SUN Y H, et al. Communication and navigation integration for LEO constellations: status, opportunities, and challenges[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(5): 90-100.
- [21] HE Y C, XU M, JIA X H, et al. High-precision repeat-groundtrack orbit design and maintenance for Earth observation missions[J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2017, 128(2): 275-294.
- [22] 杨冠男, 李文峰, 张兴敢. 天地一体化信息网络协议体系与传输性能简析[J]. 中兴通讯技术, 2016, 22(4): 39-45.
- YANG G N, LI W F, ZHANG X G. Network protocol system and transmission performance of integrated space and terrestrial information network[J]. ZTE Technology Journal, 2016, 22(4): 39-45.
- [23] CHAUDHRY A U, YANIKOMEROGLU H. Laser intersatellite links in a starlink constellation: a classification and analysis[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2021, 16(2): 48-56.
- [24] ZHU Q Y, TAO H C, CAO Y H, et al. Laser inter-satellite link visibility and topology optimization for mega constellation[J]. Electronics, 2022, 11(14): 2232.
- [25] LU Y, ZHAO Y J, SUN F C, et al. Enhancing transmission efficiency of mega-constellation LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(12): 13210-13225.
- [26] LIN Z T, LI H W, LIU J, et al. Inter-networking and function optimization for mega-constellations[C]//Proceedings of the 2022 IFIP Networking Conference (IFIP Networking). Piscataway: IEEE

- Press, 2022: 1-9.
- [27] LU Y, SUN F C, ZHAO Y J, et al. Distributed traffic balancing routing for LEO satellite networks[J]. *International Journal of Computer Network and Information Security*, 2013, 6(1): 19-25.
- [28] 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.
- [29] 徐晖, 陈山枝, 艾明. 面向6G的星地融合网络架构[J]. *中兴通讯技术*, 2023, 29(5): 9-15.
- XU H, CHEN S Z, AI M. Integrated satellite and terrestrial network architecture for 6G[J]. *ZTE Technology Journal*, 2023, 29(5): 9-15.
- [30] 袁硕, 任奕, 王则予, 等. 软件定义的星地融合智能无线网络[J]. *电信科学*, 2021, 37(6): 66-77.
- YUAN S, REN Y, WANG Z Y, et al. Software defined intelligent satellite-terrestrial integrated wireless network[J]. *Telecommunications Science*, 2021, 37(6): 66-77.
- [31] 彭木根, 袁硕. 面向星地融合的6G云雾化自组网[J]. *电信科学*, 2024, 40(3): 1-14.
- PENG M G, YUAN S. Toward satellite-terrestrial integration: 6G cloud-fog collaborative self-organizing network[J]. *Telecommunications Science*, 2024, 40(3): 1-14.
- [32] FENG J, JIANG L, SHEN Y, et al. A scheme for software defined ORS satellite networking[C]//*Proceedings of the 2014 IEEE Fourth International Conference on Big Data and Cloud Computing*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 716-721.
- [33] SHI Y P, CAO Y R, LIU J J, et al. A cross-domain SDN architecture for multi-layered space-terrestrial integrated networks[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(1): 29-35.
- [34] 黄思奇, 曾德泽, 李跃鹏, 等. 天空地融合网络架构与传输优化技术[J]. *天地一体化信息网络*, 2023, 4(2): 62-70.
- HUANG S Q, ZENG D Z, LI Y P, et al. Space-air-ground integrated network architecture and transmission optimization technology[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2023, 4(2): 62-70.
- [35] SU Y T, LIU Y Q, ZHOU Y Q, et al. Broadband LEO satellite communications: architectures and key technologies[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(2): 55-61.
- [36] WEI Y B, LI H J, DU X J. An efficient LEO global navigation constellation design based on walker constellation[C]//*Proceedings of the 2020 IEEE Computing, Communications and IoT Applications (ComComAp)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [37] 张雅声, 贾璐, 于金龙, 等. 星下点轨迹恒定的低轨星座构型设计方法[J]. *中国空间科学技术*, 2023, 43(3): 116-122.
- ZHANG Y S, JIA L, YU J L, et al. LEO constellation configuration design method with constant trajectory of subsatellite points[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2023, 43(3): 116-122.
- [38] 汤靖师, 屈颖莹, 王琦. 类星链卫星星座轨道的分析及设计[J]. *天文学报*, 2023, 64(5): 36-51.
- TANG J S, QU Y Y, WANG Q. Analysis and design of starlink-like satellite constellation[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2023, 64(5): 36-51.
- [39] OKATI N, RIIHONEN T, KORPI D, et al. Downlink coverage and rate analysis of low earth orbit satellite constellations using stochastic geometry[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(8): 5120-5134.
- [40] 李睿雯, 孙耀华, 彭木根. 基于随机几何的星地融合无线网络上覆盖性能分析[J]. *电信科学*, 2024, 40(4): 18-29.
- LI R W, SUN Y H, PENG M G. Performance analysis of satellite-terrestrial integrated wireless network based on stochastic geometry[J]. *Telecommunications Science*, 2024, 40(4): 18-29.
- [41] WANG R B, KISHK M A, ALOUINI M S. Evaluating the accuracy of stochastic geometry based models for LEO satellite networks analysis[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(10): 2440-2444.
- [42] HAN C, BAI S Z, ZHANG S H, et al. Visibility optimization of satellite constellations using a hybrid method[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 163: 250-263.
- [43] LIU S H, LI P X, CUI G F, et al. Design of satellite constellation with inter-satellite links for global communication using genetic algorithm[C]//*Proceedings of the 2017 20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 367-373.
- [44] 戴翠琴, 秦杰鹏, 许涛, 等. 基于QoS保障的低轨卫星星座设计[J]. *中国空间科学技术*, 2023, 43(3): 105-115.
- DAI C Q, QIN J P, XU T, et al. LEO satellite constellation design based on QoS[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2023, 43(3): 105-115.
- [45] CORRIE L, GREENHUT D, HAZLEHURST R, et al. Simulating the GPS constellation for high fidelity operator training[C]//*Proceedings of Position, Location and Navigation Symposium - PLANS '96*. Piscataway: IEEE Press, 1996: 222-229.
- [46] HU J H, ZHOU X W. Research on DTN architecture and its key protocols[C]//*The 2010 National Defense and Aerospace Information Technology Frontier Forum*. [S.l.:s.n.], 2010: 1-8.
- [47] Alissa Cooper, Response to "LS on New IP, Shaping Future Network", Liaison statement, IETF, MARCH, 2020.
- [48] JIANG L Z, MENG X, HU S B, et al. Research on integrated space-ground communication network based on IP over CCSDS [C]//*The 20th Academic Conference Proceedings of the Space Exploration Professional Committee of the Chinese Society of Space Science*. [S.l.:s.n.], 2007: 579-584.

- [49] 赵雄文, 张钰, 秦鹏, 等. 空天地一体化无线光通信网络关键技术及其发展趋势[J]. 电子学报, 2022, 50(1): 1-17.
ZHAO X W, ZHANG Y, QIN P, et al. Key technologies and development trends for a space-air-ground integrated wireless optical communication network[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(1): 1-17.
- [50] ZHENG S W, LU L, LIU C, et al. Key technologies of IP-based integrated satellite-terrestrial networks[C]//Proceedings of the 17th Annual Conference on Satellite Communications. [S.l.:s.n.], 2021: 92-97.
- [51] 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.
- [52] 杨芫, 徐明伟, 李贺武. 天地一体化信息网络统一编址与路由研究[J]. 电信科学, 2017, 33(12): 10-17.
YANG Y, XU M W, LI H W. Study on addressing and routing in space-ground integrated information network[J]. *Telecommunications Science*, 2017, 33(12): 10-17.
- [53] 陈天骄, 刘江, 丁睿, 等. 基于星地解耦的低轨卫星网络编址和路由策略[J]. 信息通信技术, 2019, 13(6): 65-71.
CHEN T J, LIU J, DING R, et al. Addressing and routing strategy in LEO satellite network based on spaceground decoupling[J]. *Information and Communications Technologies*, 2019, 13(6): 65-71.
- [54] CHAUDHRY A U, YANIKOMEROGLU H. Laser intersatellite links in a starlink constellation: a classification and analysis[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2021, 16(2): 48-56.
- [55] HANDLEY M. Delay is not an option: low latency routing in space [C]//Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. New York: ACM, 2018.
- [56] FENG X A, SUN Y H, PENG M G. 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.
- [57] YAN H C, ZHANG Q J, SUN Y. A novel routing scheme for LEO satellite networks based on link state routing[C]//Proceedings of the 2014 IEEE 17th International Conference on Computational Science and Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2014: 876-880.
- [58] LI H Z, ZHANG H T, QIAO L, et al. Queue state based dynamical routing for non-geostationary satellite networks[C]//Proceedings of the 2018 IEEE 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-8.
- [59] NISHIYAMA H, TADA Y, KATO N, et al. Toward optimized traffic distribution for efficient network capacity utilization in two-layered satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(3): 1303-1313.
- [60] QI X X, ZHANG B, QIU Z L, et al. Using inter-mesh links to reduce end-to-end delay in walker delta constellations[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(9): 3070-3074.
- [61] LEYVA-MAYORGA I, SORET B, POPOVSKI P. Inter-plane inter-satellite connectivity in dense LEO constellations[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(6): 3430-3443.
- [62] SORET B, LEYVA-MAYORGA I, POPOVSKI P. Inter-plane satellite matching in dense LEO constellations[C]//Proceedings of the 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [63] FAN G J, LI H W, LIU J, et al. User-driven flexible and effective link connection design for mega-constellation satellite networks [C]//Proceedings of the 2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 793-799.
- [64] MAUGER R, ROSENBERG C. QoS guarantees for multimedia services on a TDMA-based satellite network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 1997, 35(7): 56-65.
- [65] EKICI E, AKYILDIZ I F, BENDER M D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2001, 9(2): 137-147.
- [66] LU Y, SUN F C, ZHAO Y J. Virtual topology for LEO satellite networks based on earth-fixed footprint mode[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(2): 357-360.
- [67] CHEN Q, GUO J M, YANG L, et al. Topology virtualization and dynamics shielding method for LEO satellite networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(2): 433-437.
- [68] LI F, CHEN S Y, HUANG M S, et al. Reliable topology design in time-evolving delay-tolerant networks with unreliable links[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2015, 14(6): 1301-1314.
- [69] HUANG M S, CHEN S Y, ZHU Y, et al. Topology control for time-evolving and predictable delay-tolerant networks[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2013, 62(11): 2308-2321.
- [70] CASTEIGTS A, FLOCCHINI P, QUATTROCIOCCI W, et al. Time-varying graphs and dynamic networks[M]. Heidelberg: Springer, 2011.
- [71] YANG H T, LIU W, LI H Y, et al. Maximum flow routing strategy for space information network with service function constraints[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(5): 2909-2923.
- [72] WANG Y, SHENG M, ZHUANG W H, et al. Multi-resource coordinate scheduling for earth observation in space information networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(2): 268-279.
- [73] 杨惠婷, 刘伟. 空间信息网络时变图建模方法[J]. 移动通信, 2024, 48(1): 13-18.

- YANG H T, LIU W. Time-varying graph modeling method for space information networks[J]. *Mobile Communications*, 2024, 48 (1): 13-18.
- [74] YANG H T, LIU W, LI J D, et al. Space information network with joint virtual network function deployment and flow routing strategy with QoS constraints[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2023, 41(6): 1737-1756.
- [75] YANG H T, LIU W, WANG X F, et al. Group sparse space information network with joint virtual network function deployment and maximum flow routing strategy[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(8): 5291-5305.
- [76] 卢勇, 赵有健, 孙富春, 等. 卫星网络路由技术[J]. *软件学报*, 2014, 25(5): 1085-1100.
- LU Y, ZHAO Y J, SUN F C, et al. Routing techniques on satellite networks[J]. *Journal of Software*, 2014, 25(5): 1085-1100.
- [77] WERNER M. A dynamic routing concept for ATM-based satellite personal communication networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1997, 15(8): 1636-1648.
- [78] JIANG W J, ZONG P. A discrete-time traffic and topology adaptive routing algorithm for LEO satellite networks[J]. *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, 2011, 4(1): 42-52.
- [79] CHANG H S, KIM B W, LEE C G, et al. FSA-based link assignment and routing in low-earth orbit satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1998, 47(3): 1037-1048.
- [80] PAN T, HUANG T, LI X C, et al. OPSPF: orbit prediction shortest path first routing for resilient LEO satellite networks[C]//Proceedings of the ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [81] EKICI E, AKYILDIZ I F, BENDER M D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Networking*, 2001, 9(2): 137-147.
- [82] DONG C Y, XU X, LIU A J, et al. Load balancing routing algorithm based on extended link states in LEO constellation network[J]. *China Communications*, 2022, 19(2): 247-260.
- [83] LI H Z, ZHANG H T, QIAO L, et al. Queue state based dynamical routing for non-geostationary satellite networks[C]//Proceedings of the 2018 IEEE 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-8.
- [84] 李澎, 赵祥, 胡剑平, 等. 基于区域划分的 LEO 卫星星座 QoS 路由算法[J]. *遥测遥控*, 2022, 43(2): 17-24.
- LI P, ZHAO X, HU J P, et al. QoS routing algorithm for LEO satellite constellation based on region partition[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2022, 43(2): 17-24.
- [85] SVIGELJ A, MOHORCIC M, KANDUS G, et al. Routing in ISL networks considering empirical IP traffic[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(2): 261-272.
- [86] CHEN C, EKICI E. A routing protocol for hierarchical LEO/MEO satellite IP networks[J]. *Wireless Networks*, 2005, 11(4): 507-521.
- [87] LEE J, KANG S. Satellite over satellite (SOS) network: a novel architecture for satellite network[C]//Proceedings of the Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Piscataway: IEEE Press, 2000: 315-321.
- [88] ZHOU Y H, SUN F C, ZHANG B. A novel QoS routing protocol for LEO and MEO satellite networks[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2007, 25(6): 603-617.
- [89] 朱沁雨, 曹延华, 陶海成, 等. 低轨星座网络拓扑的抗毁性研究进展[J]. *计算机工程与应用*, 2022, 58(17): 1-12.
- ZHU Q Y, CAO Y H, TAO H C, et al. Research progress on survivability of low-orbit constellation network topology[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2022, 58(17): 1-12.
- [90] ZHENG D X, LIN H T, LI Q, et al. Design on the orbit transfer of rapid replenishment for navigation constellation[C]//China Satellite Navigation Office Academic Exchange Center. The 7th China Satellite Navigation Academic Annual Conference Proceedings - S04 Satellite Orbit and Clock Error. [S.l.:s.n.], 2016: 5.
- [91] LAI Z Q, WANG Y K, LI H W. Making space information networks resilient in uncontrolled environments[C]// Chinese Institute of Command and Control. The 10th China Command and Control Conference Proceedings (Volume 2). [S.l.:s.n.], 2022: 7.
- [92] 杨力, 王明洋, 潘成胜. 低轨层内星际链路的一种新的链路重构算法[J]. *计算机仿真*, 2011, 28(9): 79-82.
- YANG L, WANG M Y, PAN C S. Novel link-reconfiguration algorithm on low orbit intra-layer inter-satellite link[J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(9): 79-82.
- [93] 郭炎鑫, 郑刚. 多层卫星网络链路中断容忍路由策略设计[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(8): 1892-1897.
- GUO Y X, ZHENG G. Design of a link disruption tolerant routing strategy in multilayered satellite network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(8): 1892-1897.
- [94] LU Y, ZHAO Y J, SUN F C, et al. Dynamic fault-tolerant routing based on FSA for LEO satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2013, 62(10): 1945-1958.
- [95] 孙士然, 陈龙, 孙泽坤, 等. 低轨卫星网络服务质量保障路由方法综述[J]. *移动通信*, 2024, 48(1): 65-70.
- SUN S R, CHEN L, SUN Z K, et al. Survey of routing methods for quality of service in low earth orbit satellite networks[J]. *Mobile Communications*, 2024, 48(1): 65-70.
- [96] WANG F, WU D, HE W J, et al. CPF: bridging time-sensitive networks into large-scale LEO satellite networks[C]//Proceedings of the 2023 International Wireless Communications and Mobile Com-

- puting (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [97] 赵晶蕊, 刘江, 张然, 等. 基于蚁群算法的 LEO 卫星网络 QoS 优化路由[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(5): 590-595.
- ZHAO J R, LIU J, ZHANG R, et al. Optimization of QoS routing on LEO satellite network based on ant colony algorithm[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(5): 590-595.
- [98] 王奎宇, 宋晓勤, 缪娟娟, 等. 基于 SDN 的高性能 QoS 保障低轨道卫星星间路由算法[J]. 计算机工程, 2022, 48(5): 185-190.
- WANG K Y, SONG X Q, MIAO J J, et al. SDN-based high-performance and QoS guaranteed inter-satellite routing algorithm for low-earth orbit satellites[J]. Computer Engineering, 2022, 48(5): 185-190.
- [99] JIANG X F, HUANG Y H, LI J J, et al. Spatio-temporal routing, redundant coding and multipath scheduling for deterministic satellite network transmission[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(5): 2860-2875.
- [100] HUANG Y X, YANG D, FENG B H, et al. A GNN-enabled multipath routing algorithm for spatial-temporal varying LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(4): 5454-5468.
- [101] 曹欢, 陈岩, 周一青, 等. 空天地网络确定性服务架构、挑战及关键技术[J]. 西安电子科技大学学报, 2023, 50(3): 1-18.
- CAO H, CHEN Y, ZHOU Y Q, et al. Deterministic service of space-air-ground integrated networks: architecture, challenges and key technologies[J]. Journal of Xidian University, 2023, 50(3): 1-18.
- [102] 黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 等. 确定性网络研究综述[J]. 通信学报, 2019, 40(6): 160-176.
- HUANG T, WANG S, HUANG Y D, et al. Survey of the deterministic network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(6): 160-176.
- [103] 张雨曼, 朱厦, 梁国鑫, 等. 面向天地一体化的确定性网络技术研究[J]. 电信科学, 2024, 40(1): 24-34.
- ZHANG Y M, ZHU X, LIANG G X, et al. Research on deterministic networking technology for space-ground integrated[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(1): 24-34.
- [104] 杨增印, 李贺武, 吴茜, 等. 天地一体化信息网络域间协议实验平台[J]. 通信学报, 2019, 40(5): 1-12.
- YANG Z Y, LI H W, WU Q, et al. Emulation platform for inter-domain protocols validation of integrated space-terrestrial network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(5): 1-12.
- [105] CHENG N, QUAN W, SHI W S, et al. A comprehensive simulation platform for space-air-ground integrated network[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(1): 178-185.
- [106] YAN H C, QIAO L, NIU J X, et al. On dynamic routing technology for space network[C]//Proceedings of the 2021 International Conference on Space-Air-Ground Computing (SAGC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 106-111.
- [107] LAI Z Q, LI H W, LI J H. StarPerf: characterizing network performance for emerging mega-constellations[C]//Proceedings of the 2020 IEEE 28th International Conference on Network Protocols (ICNP). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-11.

[作者简介]



孙耀华 (1992-), 男, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为星地融合网络和无线算力网络。



冯昕澳 (1999-), 男, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为低轨卫星通信和巨型低轨星座组网。



彭木根 (1978-), 男, 北京邮电大学副校长、教授、博士生导师, 网络与交换技术全国重点实验室副主任, IEEE Fellow, 中国电子学会会士, 中国通信学会会士。主要研究方向为空天通信、云雾无线网络、通信感知计算融合等。担任 IEEE IoT 期刊指导委员会委员, IEEE Network、IEEE TVT、IEEE TNSE 等期刊的编委等。