

巨型星座路由技术综述

张佳鑫^{1,2}, 常朝阳^{1,2}, 张易隆^{1,2}, 李睿^{1,2}, 王凯巍^{1,2}, 张兴^{1,2}

(1. 泛网无线教育部重点实验室, 北京 100876;
2. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要: 针对当前卫星星座巨型化趋势, 分析巨型星座的特点, 从组网传输和业务需求两方面总结巨型星座路由的能力要求, 包含信令开销、负载均衡、故障处理、QoS保障等4个方面, 并针对性地分析适用于巨型星座的路由方法、典型算法及其表现。展望软件定义网络、区域划分、人工智能、算力路由等4种支撑巨型星座路由的相关技术方向, 以期对6G卫星互联网建设提供参考。

关键词: 巨型星座, 低轨卫星, 卫星路由

中图分类号: TN927.2

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024001

Survey on Routing Technology of Mega Constellation

ZHANG Jiabin^{1,2}, CHANG Zhaoyang^{1,2}, ZHANG Yilong^{1,2}, LI Rui^{1,2}, WANG Kaiwei^{1,2}, ZHANG Xing^{1,2}

1. Key Laboratory of Universal Wireless Communications of Ministry of Education, Beijing 100876, China
2. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: With the continuous expansion of satellite constellation, this paper analyzed the characteristics of mega constellation, and summarized the capability requirements of routing algorithms for mega constellation from two aspects of networking transmission and service requirements, included reducing signaling overhead, load balancing, fault recovery, and guaranteeing QoS. In addition, it introduced the routing methods, algorithms, and their performances that were applicable to mega constellation. It looked forward to the future related technology directions for mega constellation, included software defined network, area division management, artificial intelligence, and computing power routing, with the aim of providing reference for the construction of 6G satellite Internet.

Keywords: mega constellation, low earth orbit satellite, satellite routing

0 引言

随着全球无线网络覆盖和通信需求的不断增长, 卫星互联网成为了第六代移动通信标准(6G)的重要研究方向^[1-2]。国际电信联盟发布的《IMT 面向 2030 及未来发展的框架和总体目标建议书》^[3]中明确提到泛在连接、超大规模连接为 6G 系统的主要应用场景之一。卫星通信因其组网灵活、覆盖范围广、不受地理环境制约等优势, 将在 6G 建设中受到更多关注^[4]。卫星通信系统按照卫星轨道的高度不同, 可以分为低轨(Low Earth Orbit, LEO)卫

星、中轨(Middle Earth Orbit, MEO)卫星、地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星。相比 GEO 卫星, LEO 卫星以其对地传播时延小、发射成本低、技术更新快等优点已成为研究热点^[5-6]。

近年来, 低轨卫星通信已进入快速发展阶段。批量化、模块化的卫星制造技术显著降低了卫星的制造成本^[7]; 火箭重复利用与“一箭多星”等技术极大地降低了卫星的发射成本; 集成电路技术的进步也促进了卫星的模块化、组件化和小型化, 大幅提升了卫星的处理能力, 显著降低了卫星的研制成本。此外, 随着激光、微波等星间链路技术

收稿日期: 2023-08-01; 修回日期: 2024-01-30

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(No.2023ZCJH09); 国家自然科学基金资助项目(No.61901048, No.62071063); 国家重点研发计划资助项目(No.2022YFB2902501, No.2020YFB1807903)

Foundation Items: The Fundamental Research Funds for the Central Universities(No.2023ZCJH09), The National Natural Science Foundation of China(No.61901048, No.62071063); National Key Research and Development Program of China(No.2022YFB2902501, No.2020YFB1807903)

的逐渐成熟,卫星间可以实现大带宽直接组网,减少了地面信关站的数量,消除了地面与卫星的多跳问题,降低了通信时延^[8]。因此,巨型卫星系统的高带宽、低时延、低成本全球互联服务优势愈发凸显,大规模低轨星座发射计划层出不穷,卫星数量呈爆炸式发展趋势,低轨卫星互联网正式进入大规模、巨型化时代。

路由技术是保证卫星互联网各节点之间互联互通的基础性技术,也是卫星互联网的重要研究方向。由于卫星网络具有网络拓扑变化频繁、单星资源受限、网络故障修复困难等特点,地面网络的路由策略并不直接适用于卫星网络。而目前针对卫星网络的路由算法主要采用基于时间片的静态路由算法以及集中^[9]、分布^[10]、集中分布结合^[11]的动态路由算法。这些算法大多依赖于地面集中控制中心,仅适用于较小规模的卫星星座。相较而言,巨型星座具有拓扑动态性高、路由更新频繁、信令开销巨大、负载均衡相对困难、受网络故障影响大、业务服务质量(Quality of Service, QoS)要求多样等特点,因此,用于小规模星座的卫星路由算法并不能完全适用于巨型星座。

很多学者针对卫星路由算法开展了研究并根据其特点形成综述^[12],但是目前已有关于卫星星座网络的路由算法综述尚未针对巨型星座开展专门研究。本文面向巨型星座,从组网传输和业务需求两方面总结其对星间路由算法的能力要求,并详细介绍适用于巨型星座的路由方法、典型算法及其表现。

1 巨型星座特点及其路由能力要求

1.1 巨型星座特点

近 20 年来,LEO 卫星的发射数量激增了 40 倍,年度发射卫星总数的占比由 57%快速增长到 97%^[1]。相较于 20 世纪末铱星系统与全球星系统的 66 颗卫星和 48 颗卫星,近几年的卫星星座建设计划一经提出,其规模就高达成百上千颗^[13]。这些巨型星座相比于早期卫星星座具有大规模广覆盖、拓扑高动态、路由高复杂度、故障易发且处理难度大、计算能力提高、业务需求多样、系统高容量、负载均衡分布不均等特征,具体表现如下。

(1) 大规模广覆盖。巨型星座卫星节点数量急剧增加,星座系统节点数量达成千上万颗,同一高度的 LEO 卫星节点数量也达到成百上千颗。因此,可以覆盖更广泛的地理区域,为全球通信提供更加稳定和高效的服务。

(2) 拓扑高动态。随着卫星节点数量的增加,高速运动的巨型星座节点间的星间链路的距离变化以及建断链更加频繁,卫星拓扑连接关系动态时变,具有高动态性。

网络拓扑频繁变化进而导致路由更新频繁,路由策略生成与路由表更新周期亟须缩短。

(3) 路由高复杂度。巨型星座卫星节点数量增多且节点密度高,数据包端到端传输所历经的卫星节点及星间链路数量增多。传输路径跳数的增加提高了路由过程中信息感知、计算、上注和同步的复杂度。

(4) 故障易发且处理难度大。卫星所处复杂外太空环境带来的电磁干扰、人为破坏、自身故障等因素都会影响到卫星节点与星间链路的正常运行。巨型星座的节点密度高,任一节点或链路发生故障后受影响的业务传输链路数目更多,这使得网络故障检测、故障诊断和故障处置的难度加大。

(5) 计算能力提高。参考文献[14]指出卫星的星上处理能力主要受到板载芯片处理能力、载荷功耗以及星上物理可用空间的约束。随着技术的发展,芯片集成度和处理能力的提高以及星上板载空间的延展都会提高卫星的处理能力。巨型星座卫星数量的增加与单颗卫星处理能力的增强使其处理计算任务成为可能。

(6) 业务需求多样。巨型低轨星座因其广覆盖、时延较低的优势可以提供高速、稳定的通信服务,其不仅可以服务于地面通信设备,也可以服务于广域物联网设备、车载或机载“动中通”设备。卫星能力的提高使得其可以处理快速目标识别、战场态势感知等多样化业务。

(7) 系统高容量。巨型星座通常使用 Ka、Ku 频段,甚至 V 频段,具有更高的可用带宽。卫星使用更先进的多址方式、跳波束技术、高增益的天线设计、动态资源分配技术可以有效地提高系统容量,从而提供更多的业务接入服务。

(8) 负载分布不均。地球表面的陆地及海洋分布、人口分布与经济差异等因素均会造成业务分布的不均匀^[15],导致部分卫星需要处理的业务量超过其处理能力,数据包排队时延增加,甚至被丢包。而另一部分卫星需要处理的业务量远低于其处理能力,导致卫星资源被浪费。巨型星座中卫星节点数量多,业务负载分布不均的特征更加凸显。

此外,巨型低轨星座也面临轨道维护与卫星生产发射的巨大开销、卫星回收不便、易造成太空污染等问题。

1.2 巨型星座路由能力要求

上文提到了巨型星座的特点,这些特点为巨型星座的路由算法设计带来了新的挑战,本小节将从组网传输和业务需求两方面展开分析。

在组网传输方面,由于巨型星座具有拓扑高动态、路

由高复杂度、故障易发且处理难度大等网络特征,因此路由算法需满足高效智简、信令开销小,以及高韧性、故障处理能力强等要求。

(1) 高效智简、信令开销小。巨型星座路由算法需要在保持高效的同时降低信令开销,包含集中式控制中用于上注、洪泛的信令与分布式管控中用于链路状态收集、链路信息洪泛、拥塞控制过程中的信令,避免网络状态交换占用过多带宽资源。

(2) 高韧性、故障处理能力强。巨型星座中路由传输跳数增加,导致传输复杂度高且节点与链路易发生故障。如果算法不能适应网络故障,会极大地增加网络丢包率,降低服务质量。为了提高网络韧性,路由算法需要有故障处理能力,表现在当星间链路发生拥塞、卫星节点或星间链路发生故障时,数据包仍然可以无环路地满足时延要求的传输。

在业务需求方面,伴随着巨型星座计算能力的提高,上述多样化的业务需求、更高的系统容量和负载分布不均等特点,也要求路由算法具备多业务 QoS 保障和全局负载均衡的能力。

(1) 多业务 QoS 保障。巨型星座服务涵盖偏远地区、海洋、动中通等多种场景,这些场景的业务需求在时延、带宽、丢包率等方面存在显著差异。面对多类型的业务接入,巨型星座路由算法需要根据业务的要求选择合适的路径完成数据传输。

(2) 全局负载均衡。巨型星座覆盖面积广,受到地形、人口密度、经济条件的影响,接入流量分布不均,因此,巨型星座路由算法需要在满足业务要求的前提下,均衡不同卫星的接入业务量,避免节点拥塞,提高网络可靠性与吞吐量,增加网络灵活性。

2 巨型星座路由技术分类

下面将从巨型星座路由所需的能力要求出发,从高效智简、信令开销小,负载均衡,故障处理, QoS 保障 4 个方面,给出满足不同能力要求的巨型星座路由技术。

2.1 高效智简、信令开销小

在卫星路由过程中所涉及的信令主要分为状态信令和路由信令两种。状态信令将链路状态和卫星状态广播至邻居卫星或一定区域范围内的卫星,帮助卫星做出路由决策。其中,链路状态包括速率、时延和丢包率等,卫星状态包括负载情况、拥塞状态、能量和计算能力等。路由信令的作用则是传递路由计算结果和路由表。降低信令开销的路由方法主要归纳为缩小信令洪泛范围和利用星历信息计算最优路径这两类,具体见表 1。

(1) 缩小信令洪泛范围。卫星状态信息不必洪泛至每一颗卫星,而是限定在某一特定区域,设定洪泛时间或跳数使状态信息只传递至邻近的卫星,进而降低信令开销。

基于上述思路,参考文献[16]提出的方案在链路失效或恢复的情况下,通过设置状态信令生存时间,将链路状态洪泛限定在受限区域内,并通知卫星更新受影响路径的状态。参考文献[17]采用同样的思路,将卫星划分区域管理,区域内采用集中式路由,区域间由区域边缘节点进行分布式路由,这样区域间路由就不会因卫星间链路的断裂而改变,当发生常规或不可预测的拓扑变化时,路由可以以很少的开销快速重建。路由收敛时间是开放式最短路径优先(Open Shortest Path First, OSPF)算法的 50%~75%。参考文献[18]中所提算法与在全网拓扑上进行路由洪泛的协议不同,这种机制仅在全网拓扑的子拓扑上洪泛路由信息,该子拓扑的链路由所有轨道内链路和相邻轨道的两个轨道间链路构成,保证所有卫星均可接收到洪泛信息,可

表 1 降低信令开销路由算法分类

算法类型	算法名称	星座规模/颗	特点	减少的信令种类	性能改进
缩小信令洪泛范围	X-Y ^[16]	1 600	为洪泛故障信息设置生存时间,从而限制洪泛范围	状态信令	链路状态数据包减少为未使用洪泛受限机制时的 1/50 ~ 1/10
	ASER ^[17]	1 296	将卫星网络划分区域,限制洪泛范围在区域内	状态信令	路由收敛时间是 OSPF 算法的 50% ~ 75%
	lightweight ^[18]	168	计算包含所有节点的子拓扑,限制洪泛在子拓扑链路上	路由信令	路由收敛时间比 OSPF 算法降低了 21% 左右
利用星历信息计算最优路径	LADRA ^[19]	648	将周围卫星的轨道参数预先存储,实时计算出周围卫星的经纬度。降低卫星与其周围卫星交互产生的信令开销	状态信令	降低了路由开销随跳数增长的速度
	LABRA ^[20]	66	利用星历信息预测卫星在阴影区的时间,避免在阴影区的传输,减少卫星之间交互的信令开销	状态信令	当终端比特速率上升到 1.3 Mbit/s 时,丢包率才开始上升

大幅减少链路状态更新包的数目，路由收敛时间比 OSPF 算法降低了 21%左右。

(2) 利用星历信息计算最优路径。星历是一种描述太空飞行体位置和速度的方式，以开普勒定律的 6 个轨道参数之间的数学关系确定卫星的时间、位置、速度等运行状态，卫星不需要通过信令包与其他卫星交互，就可以得到网络拓扑关系，进而计算出路由方案。因此在设计大规模卫星路由时，可以使用卫星星历对星座中的卫星进行位置预测。

利用星历信息，参考文献[19]根据卫星运行位置可预测的特性，将周围卫星的轨道参数预先存储，实时计算出周围卫星的经纬度，降低路由开销随跳数增长的速度。参考文献[20]通过实时计算周围卫星的经纬度，进而判别出邻居卫星是否在日照区或阴影区，优先考虑在日照区的卫星为下一跳，降低能耗的同时减少路由信令开销。

综上所述，缩小信令洪泛范围的思路分为从时间上限制信令洪泛和从空间上限制信令洪泛，主要目的是减少卫星间无效的信令交互。而利用星历信息可直接使卫星获得其他卫星的信息，从而代替部分信令交互功能，例如对网络拓扑结构的感知。未来可将两种思路结合，在卫星上预存周期性的星历信息，对于不可预测的信息，如拥塞状态、卫星故障状态，则需要发送信令包获取信息的同时限制信令洪泛范围。

2.2 负载均衡

表 2 对适用于巨型星座的负载均衡路由算法进行了分

类总结，主要包括流量预测、利用备选路径分类和利用业务流量分类 3 种。

(1) 基于流量预测的负载均衡路由算法。该类算法是指卫星先对即将到达的流量进行预测，再对当前卫星链路的流量进行分流或绕行的路由策略。其中，采用分流技术可以将卫星一条链路上的流量按一定比例分配到其他负载较低的链路，绕行则可将一条链路的流量完全转移到某条新的链路，以此达到负载均衡的目的。

参考文献[21]的算法中，卫星发生拥塞时，标记所在的地理位置为拥塞区，并将位置信息发送给其他卫星。当卫星进入拥塞区时，可预测即将到达的突发流量，卫星即可在负载超过较低的门限时就开始提前分流。该算法可显著降低丢包率随每个流的平均比特率增大的速度。刘子鸾等^[22-23]提出了全局与局部相结合的负载均衡路由算法，算法设定了两个门限值，当卫星负载超过较小门限值时，可预测该卫星即将拥塞，通知邻居节点计算不包含该节点的分流路径，当卫星负载超过较大门限值时，通知邻居节点按比例分流。仿真结果显示该算法可降低丢包率、平均时延，提高流量空间分散指数。参考文献[24]对地面流量采用虚拟节点法，将地球表面划分区域并根据统计信息预测业务流量。在数据分组的换路时延大于排队时延时，优化缓存队列分配以提供足够的缓存空间；在数据分组的换路时延小于排队时延时，则通过更换路由路径避免排队时延的增加。仿真结果表明所提策略可以改善丢包率、端到端时延和业务空间分布指数。参考文献[25]将地面区域分为低负

表 2 负载均衡路由算法分类

算法类型	算法名称	星座规模/颗	算法简述	传播时延	链路带宽	排队时延	邻居卫星状态
流量预测	DLBMBCP ^[21]	66	卫星标记已发生拥塞的区域并将位置传输给邻居卫星。在这些区域相关卫星将执行门限较小的负载均衡算法	×	×	√	×
	HGL ^[22-23]	288	将流量分解为大尺度变化和小尺度随机波动。首先采用全局负载均衡策略初步分配流量，之后使用局部策略进行实时的流量调整	√	×	√	×
	基于流量预测的卫星节点动态缓存分配路由 ^[24]	66	根据统计信息预测地面流量，采用分流策略，减小向拥塞节点发送业务量的比例，使得拥塞节点在一定时间内恢复	√	×	√	√
	DLR ^[25]	66	第 1 阶段建立最优路径实现全局负载均衡。第 2 阶段局部调整，在卫星负载超过门限后按比例分流实现局部负载均衡	√	√	√	×
利用备选路径分类	HLBRm ^[26]	128	除局部负载均衡外增加备选路径使流量绕过易拥塞区	√	×	√	√
	RMLBR ^[27]	—	根据当前卫星不同方向链路的拥塞情况选择最优路径或备选路径	√	×	√	×
利用业务流量分类	DCCR ^[28]	66	将业务分为 3 种类型，为每种类型的业务设计路由策略，在负载均衡的同时提高用户的满意度	×	×	√	
	基于拥塞避免的卫星路由 ^[29]	288	根据业务类型和拥塞程度使拥塞卫星的邻居卫星重新选择下一跳节点或通过 GEO 卫星传输实现负载均衡	×	×	√	×

注：表中“√”符号表示该算法负载均衡时考虑了表头的因素；“×”符号表示该算法没有考虑表头的因素；“—”符号表示参考文献中无相关内容。

载区和高负载区,在算法第 1 阶段建立最优路径,通过蚁群算法实现全局负载均衡;在第 2 阶段局部调整,低负载区卫星使用较高门限,高负载区卫星使用较低门限,在卫星负载超过门限后按比例分流实现局部负载均衡。结果显示该算法对丢包率、平均时延、流量空间分布指数等指标均有优化。

(2) 利用备选路径分类的路由算法。该类算法是指源卫星收到地面传来的数据包后计算出到目的卫星的主路径和备选路径,优先使用主路径传输;当主路径发生中断时,直接用备选路径传输直到主路径恢复,以此保证主路径中断后,数据包依旧能够快速重传。

参考文献[26]中的算法首先使用最短路径进行路由,链路拥塞时采用流量绕行。为进一步解决局部负载均衡导致的级联拥塞,实现全局负载均衡,设计了长距离绕行方案使数据包绕过高负载区。在 4.60 Tbit/10 min 的流量下,所提算法相比其他两种算法,丢包率降低了 51.5%和 77.46%。参考文献[27]提出的算法开始时将排队时延和传输时延作为链路代价,以链路代价最小为目标,计算一条最优路径及一条备选路径。卫星选择下一跳时,根据最优路径和备选路径的链路状态,选择只使用最优路径或将一半流量分给备选路径,从而实现负载均衡。在 148.3 Tbit/d 的输入条件下,算法的丢包率为 3.38%,吞吐量为 830.51 Gbit/s。

(3) 基于优先级和时延敏感特性的负载均衡路由算法。按优先级将业务类型从高到低分为用于通知消息的信令包、对时延敏感的实时业务和对时延不敏感的其他业务。在负载均衡算法中对不同的业务类型采用不同的路由策略,以保证时延敏感型业务优先传输。

参考文献[28]中,时延敏感型业务遵循最短路径传输,带宽敏感型业务优先选低纬度链路传输,对时延不敏感的业务则是以特定的比例绕行拥塞的节点。算法能使每种类型的流量的平均时延保持在较低水平。参考文献[29]的算法中,当数据包到达某节点时,节点首先检查该数据包的类型,再根据节点的拥塞状态选择将数据包放入缓存队列、发送信令包控制邻居节点的流量流入或通知前向节点重新选择下一跳节点。拥塞严重时可通过 GEO 卫星转发部分对时延不敏感的业务。文中的拥塞避免和业务分类机制,极大延迟了拥塞出现的时间:数据传输率约为 1 900 kbit/s 时,网络的平均端到端时延才开始突然增大。

通过上述算法的对比,总结卫星路由通过流量绕行或分流实现负载均衡时应主要考虑的几个因素。

(1) 传播时延:在有链路拥塞需要绕行或分流时,应考虑包发送过程的时延,不应绕行过远导致时延过长。

(2) 排队时延:当链路占用率较高时,数据包进入链路不会直接发送而是排队等候,因此为保证总时延不至于过大,要将排队时延也作为考虑因素。

(3) 链路带宽:链路剩余带宽也反映了链路的占用情况,数据包处于当前节点时,可将最新得到的当前网络链路带宽占用情况转换为占用带宽权重。

(4) 相邻卫星状态:为了防止数据包进入的下一跳卫星的所有路径均拥塞,无法选择下一跳卫星的情况,要考虑相邻卫星的链路状态。

流量预测方法和备选路径方法可作为负载均衡过程的两个阶段。卫星通过信令包的交互获取卫星负载、链路负载、地理位置等信息并对负载进行预测。如果某颗卫星预测到即将发生拥塞,则通过备选路径提前分流。这两种方法均可与业务分类的方法同时使用,优先级最高的业务按最短跳数路由,优先级较低的业务在需要负载均衡时优先分流,从而满足多种业务类型的 QoS 需求。

2.3 故障处理

卫星运行过程中,电磁干扰、物理故障、能量限制等因素都可能导致故障,这些故障会在巨型星座中产生更大影响。表 3 总结了故障处理路由算法分类,分为节点故障和链路故障两大类,处理方法可大致分为分区域管理、基于软件定义网络(Software Defined Network, SDN)和基于环路避免技术。

(1) 分区域管理路由方法。在处理故障的过程中,由于卫星需要获取其他卫星的故障信息并根据算法选择下一跳,这对星上计算能力、存储能力等有较高要求。因此,对卫星网络区域按照需求进行划分,是简化管控方法、降低对卫星存储计算性能要求的有效手段。

按照这一思想,参考文献[17]使用分区域路由机制,根据拓扑结构将网络划分成规则的矩形,卫星被分组到各个区域。当卫星出现故障时,域间路由不会受到影响,而域内路由因涉及的卫星数较少,可以以较少的开销快速重建路由。参考文献[30]在设计抗毁路由算法时提出一种基于人口密度的正多边形分域机制,每个区域设置区头节点收集该区域故障信息上报总节点,并下发信息给区域内节点。

(2) 基于 SDN 的路由方法。SDN 技术将网络的控制平面和数据平面相分离,低轨卫星节点可作为数据平面仅负责数据的传输,而链路的维护和路由计算都由控制平面进行处理。巨型星座星间信令跳数大幅增加,使用该技术

表 3 故障处理路由算法分类

算法类型	算法名称	星座规模/颗	故障处理方法	故障类型	性能改进
分区域管理	ASER ^[17]	1 296	将卫星网络划分区域，出现故障时域间路由不会受到影响，可以快速重建路由	链路故障	路由收敛时间是 OSPF 算法的 50%~75%
	MFDR ^[30]	66	基于人口密度划分区域，使总节点下发的指令很快到达区头节点，从而下发到各个成员节点，及时上报故障信息	节点故障	在故障发生后恢复的路径时延方面、有效资源利用率方面都优势明显，算法运行时间也略有降低
基于 SDN	FTR ^[31]	66	控制与业务分离，卫星节点仅负责数据的传输，而链路的维护和路由计算都由控制器处理	节点故障	当网络中节点和链路的失效情况较严重时，FTR 的路由总时延比其他算法降低了 3.99%~37.95%
	SDSN ^[32]	66	利用主动上报式故障检测机制将故障发现时延降低到毫秒级，同时设计了链路故障检测算法来实现对故障的准确定位	节点故障	可同时保证故障恢复时间和端到端时延较低
基于环路避免技术	TRL ^[33]	66	数据包记录经过的卫星节点序号，选择下一跳时查询记录，防止形成环路	节点故障	算法对丢包率、时延、流量分布指数有优化
	X-Y ^[16]	1 600	部分记录循环避免机制，仅在数据包偏离主方向后记录节点	链路故障	在 20%链路故障的情况下，链路状态报文数量仅为链路状态算法的 1/10

可更快地监测和控制整个网络的状态，故障信息也更容易发送至其他卫星。

参考文献[31]在 3 层卫星网络的基础上基于 SDN 设计了一种卫星网络模型，作为局部控制器的 MEO 卫星对其通信范围内的卫星进行控制，收集网络状态信息，并上传给 GEO 卫星，GEO 卫星通过广播发送给地面控制中心，地面控制中心计算出路由表后上传给 LEO 卫星，最后 LEO 卫星执行容错路由算法。与参考文献[31]绕行故障卫星的方法不同，参考文献[32]提出了一种软件定义卫星网络架构下的链路故障检测和恢复方法。结合保护式和恢复式两种方案的优势，先为所有业务预先计算备选路径，在主路径出现故障后先由备选路径恢复业务，当地面网关控制器计算好新的最优路径后再由最优路径传输，既可降低故障恢复时间，又可保证较低的传播时延。

(3) 基于环路避免技术的路由方法。路由算法为了规避故障节点，会选择在遇到故障节点时绕行，当故障节点较多时，由于数据包的多次绕行，可能使其回传至起始节点。由于采用的路由算法相同，数据包传输会形成环路。因此路由算法中需要增加环路避免机制。

参考文献[33]提出了一种基于红绿灯的卫星网络智能路由策略，其中的环路避免机制要求数据包传输时在其头部记录传递的跳数，当数据包到达卫星时，卫星的标号被插入数据包的头部；然后检查下一跳的候选节点是否出现在头部，将出现的节点从候选节点中排除。如果当前节点的候选节点都被排除，则将数据包退回上一节点。参考文献[16]提出了一种部分记录循环避免机制，主

要思想是仅在必要时记录节点，只有当数据包下一跳方向不为主方向时，数据包才会在头部记录卫星。上述基于环路避免技术的路由方法在网络中的故障发生较少时可减少信令开销。

在大规模卫星星座中，根据故障发生的频率或数量需采用不同的故障处理机制。如果少量卫星发生故障，可使用分区域管理或 SDN 技术进行故障的处理。如果大量卫星发生故障，则会形成故障块，此时需要在路由算法中额外加入环路避免机制。未来可将 SDN 技术与分区域管理相结合，MEO 卫星或 GEO 卫星作为 SDN 技术中的控制平面，每个控制平面的卫星管理其连接范围内的一组卫星。这样不同区域之间的故障信息传递速度会得到较大提升。

2.4 QoS 保障

典型的卫星通信业务可分为快速目标识别、广域物联业务、星上快速处理等，其对于时延、容量、连接数等的需求差异很大。表 4 总结了适用于巨型星座 QoS 保障的路由算法。

多业务 QoS 保障路由算法主要通过为不同业务设置不同的约束代价来计算路由，或根据不同的业务需求选择不同的算法来实现不同业务的区别处理，满足各类业务的要求。

参考文献[34-37]将业务分为 3 类，分别为交互式实时数据传输等时延敏感型业务、多媒体视频点播与大文件传输等带宽敏感型业务、无特殊要求的尽力交付型业务。使用遗传算法与基于 SDN 架构的路由算法是解决 QoS 保障的两种重要途径。

表 4 适用于巨型星座 QoS 保障的路由算法

算法类型	算法名称	星座规模/颗	算法简述	有无负载均衡	性能改进
遗传算法	MSR-RP ^[34]	72	划分动态区域, 在低负载区采用最短路径算法计算路由, 高负载区采用多目标遗传算法保障不同业务 QoS 并实现负载均衡	有	可有效降低优先级较低类业务的丢包率和平均时延
	PMGA ^[35]	96	基于 Pareto 多目标遗传的 LEO 卫星网络多业务 QoS 路由算法, 对卫星链路持续时间、链路可用带宽以及卫星的使用寿命期限进行建模, 利用遗传算法搜索 Pareto 问题的最优解	有	选择路径时考虑了不同业务的 QoS 需求, 使加权 QoS 代价较小
基于 SDN 架构的路由算法	MQOO ^[36]	16	基于 SDN 得到链路状态, 使用最短路径路由算法寻找最短路径并使用拉格朗日松弛法对问题进行松弛, 处理得到链路权重公式, 并根据链路状态动态改变链路权重, 直到所选路径满足 QoS 需求	无	该优化算法在 QoS 满意度方面相比近地轨道卫星路由算法提高了 64%, 在时延满意度和丢包率满意度方面相比软件定义路由算法提高了 28%
	基于 SDN 的 QoS 保障 ^[37]	36	基于 SDN 架构, 建立链路稳定度函数、链路负载度函数、链路代价函数调节权重因子计算满足多业务 QoS 要求的路径	有	相比对比算法降低了时延, 提高了吞吐量

(1) 遗传算法。遗传算法是解决多目标优化的有效方法, 借助其随机性和隐含并行性的优势, 能同时搜索多目标优化问题的最优解。

MSR-RP 算法^[34]通过划分区域, 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; 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^[35]提出了一种基于 Pareto 多目标遗传的 LEO 星座多业务 QoS 路由算法, 将业务分为 3 类, 同时对卫星链路持续时间、链路可用带宽以及卫星的使用寿命期限进行建模, 利用遗传算法搜索 Pareto 问题的最优解。

(2) 基于 SDN 架构的路由算法。SDN 架构将控制与业务分离, 能够更好地掌握网络链路状态, 保证较低的数据传输时延和更少的资源消耗, 实现资源优化分配, 适合用来解决多业务 QoS 保障问题。

参考文献^[36]提出一种基于 SDN 架构的多 QoS 目标优化算法, 使用 Dijkstra 算法寻找最短路径, 使用拉格朗日松弛法对多约束问题进行松弛处理, 得到链路权重公式, 修改权重到所选路径以满足 QoS 的需求, 并逐步迭代, 找出满足多 QoS 需求的最优路径。参考文献^[37]提出基于 SDN 架构的高性能 QoS 保障路由算法, 高轨道卫星得到的星间链路的流量状态, 定义链路负载矩阵, 给出星间链路负载度函数, 并获得每条路径的负载度, 针对不同要求的业务服务类型定义权重因子矩阵, 通过调整权重因子来满足多用户的 QoS 要求。

对于多种业务类型和多目标 QoS 问题, 所涉及的优化目标有多个, 例如时延、吞吐量、丢包率等。直接设计合适的 QoS 路由算法较为困难, 而遗传算法则简单有效。遗传算法可有效利用信息并根据反馈动态调整路由策略。SDN 技术使得网络链路状态更易获取, 可以以较低的时延和信令开销实现资源分配, 为遗传算法的实现提供了保障。

3 巨型星座路由技术展望

上文针对巨型星座路由技术所面临的问题依次介绍了已有的解决方案, 并依据其所满足的能力要求进行了分类总结。下面将对巨型星座路由相关技术进行展望, 以期对未来研究提供思路。

3.1 基于软件定义网络的协同控制路由算法

上文已经提到 SDN 技术可以有效解决巨型星座故障处理、QoS 保障等问题。然而, 巨型星座还面临卫星节点存储、计算、通信性能等方面差异巨大、空中接口协议多样、跨频段混合组网等问题, 这就要求巨型星座路由算法具备较高韧性。

因此, 未来巨型星座路由可进一步基于软件定义网络的控制与业务分离的思想, 进行灵活的分级协同路由控制。如图 1 所示, 拥有较强能力与较大覆盖范围的 GEO 卫星可依靠自身的感知控制能力或基于地面控制器上注的感知信息和控制指令进行全局调度, 合理分配网络资源, 基于其掌握的信息做出更合适的路由决策, 并将策略下发至 MEO 卫星或 LEO 卫星。MEO 卫星进行局域信息收集和链路故障处理, 并下发至 LEO 卫星。LEO 卫星仅需完成简单的计算任务、链路状态感知和数

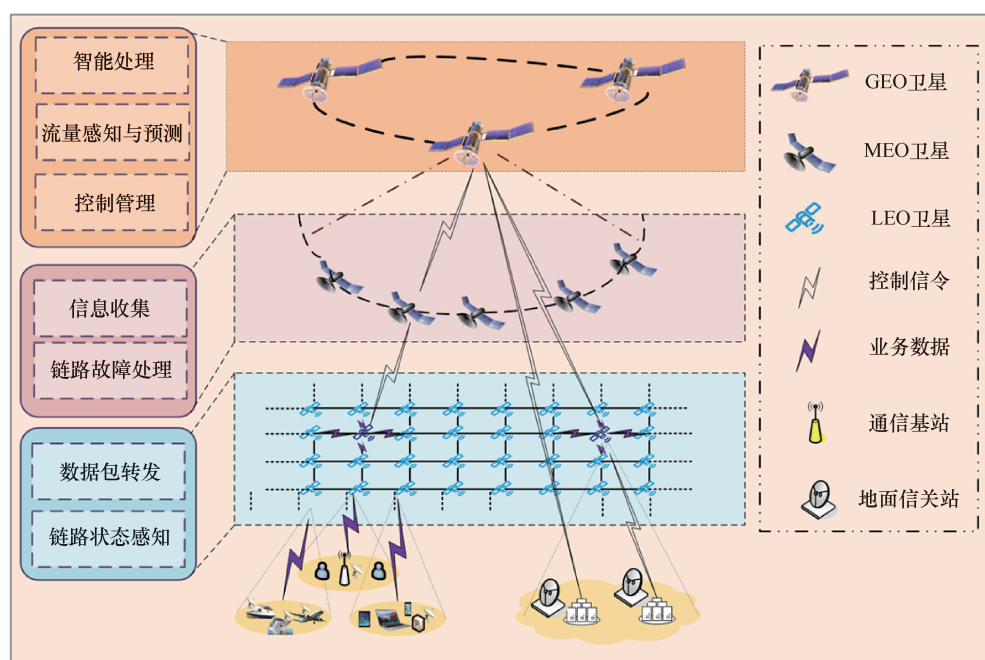


图 1 基于 SDN 的卫星路由算法示意

据包转发。利用基于软件定义网络的协同控制路由算法，深度结合多级卫星和地面站、网关和控制中心的协作有望提升大规模卫星星座的韧性。具体地，包括如何设计适配多体制、多场景、多频段的网络路由方法，规范各网络实体的功能，完善节点间信息交互过程，实现韧性高、可扩展性强、服务质量有保障的路由算法是值得研究的方向^[38-39]。

3.2 区域划分路由算法

区域划分路由算法的核心思想是将卫星星座划分为不同的区域，在各区域中进行路由计算并完成区域间的信息交互^[40]。前文已经提到利用区域划分来降低路由信令开销。

而区域划分方法不仅是降低复杂度的主要手段，更与业务负载均衡结合紧密。由于全球通信业务具有较强的区域性，超远距离通信占比较小，因此可以通过对区域的合理划分，进一步实现高质量的通信，降低路由拥塞的可能，并更好地保障端到端服务质量。

具体地，区域的划分方法多样，可以根据卫星轨道或者根据地理位置进行区域划分得到规则形状的区域^[41-42]；也可以根据人口密度分布或者根据通信业务需求划分成不规则形状的区域^[30]；还可以根据情况对区域的划分情况进行动态调整。总之区域的划分没有确定的规则，即使使用相同的划分方法，不同的区域大小也会对路由算法的表现有影响。对大规模卫星星

座的区域划分方法、区域大小的设置、区域的动态调整、区域内与区域间的路由算法的设置、区域划分与业务流量的匹配、针对不同区域的差异化路由算法都是值得进一步研究的方向。

3.3 人工智能路由算法

卫星路由在研究早期主要考虑数据包的最短跳数传输、星上负载、服务质量、节点故障等单一问题。随着低轨卫星通信星座的快速投入使用，路由策略面临着多种影响因素和现实制约条件，星上路由的设计难度进一步加大，人工智能技术为此提供了新的思路。强化学习因其不依赖专家经验，可自动提取网络流量信息，更适合解决网络路由中的复杂问题，在卫星通信中具有良好的应用前景。

图 2 给出了卫星星座路由中的强化学习模型，具体的算法中，可以根据目标设置强化学习模型中的状态、奖励、动作集合。环境信息包括卫星负载、链路等信息，卫星作为智能体，通过接收信令包感知环境并由此决定数据包的转发方向。动作集主要包括数据包转发方向。状态则包括排队时延、节点距离、业务需求、算网能力等奖励函数，可配置为做出动作后的传输时延、排队时延、节点距离等^[43-47]。

进一步地，在大规模卫星通信中可采用深度学习算法，以避免强化学习路由算法对于参数选取的依赖。深度学习算法可直接从原始的数据中提取高水平特征，其

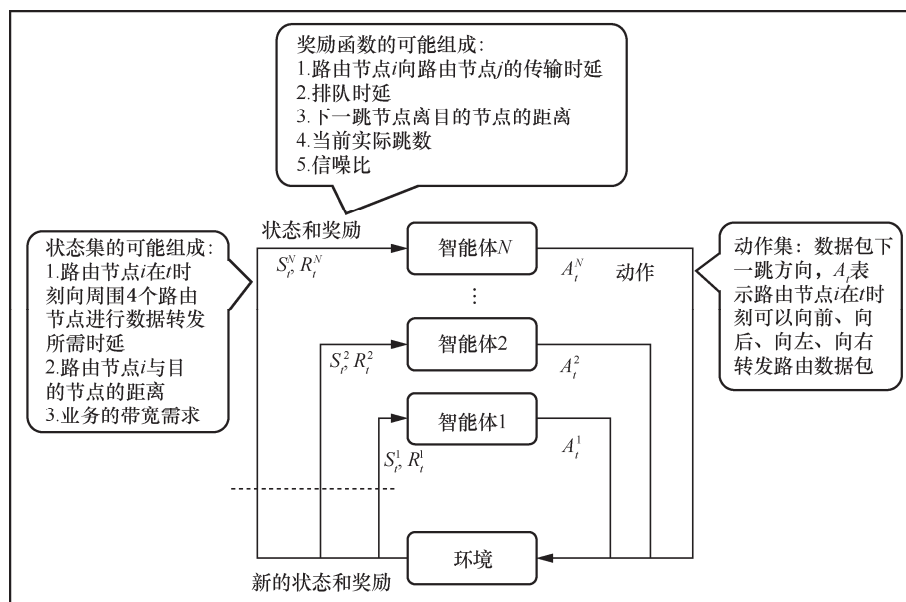


图2 卫星星座路由中的强化学习模型

高效、适应性强的特点正是当前卫星路由模块所需要的。进一步的研究中,也可将强化学习与深度学习相结合,发挥二者的优势,为解决巨型星座路由问题提供新思路。

3.4 星上算力路由算法

算力路由是指根据网络状况和计算资源状况,将业务灵活按需调度到不同的计算资源节点中,并为其规划满足要求的路径。随着芯片集成度与处理能力的提高,卫星的计算能力显著提升,低轨卫星可以承担部分计算任务,同时包括单星在轨实时图像处理等的星上计算任务的需求与复杂度不断提高,星上算力路由成为卫星网络发展的趋势。在算网融合的趋势下,如何有效地进行星上算力感知,将算力因素加入路由计算,研究算网融合路由算法为星上任务寻找合适的处理节点与传输路径是大规模卫星星座路由的重要研究方向。此外星上算力路由算法还亟须解决星上单星多任务的任务卸载及多星协同任务卸载与处理的问题。

4 结束语

巨型星座通信作为卫星互联网发展的重要趋势,具有极高的实用前景和理论研究价值,是下一代无线网络的重要组成部分。而路由技术作为关键技术之一,关系到灵活智能转发、对地网络协作、业务适配传输、故障快速处理等卫星通信核心功能。本文针对巨型星座路由所需的关键技术能力,总结了当前满足不同能力需求的巨型星座

的路由方法,并展望了支撑大规模卫星路由的技术前景,以期对 6G 卫星互联网建设提供参考。

参考文献:

- [1] WANG C X, YOU X H, GAO X Q, et al. On the road to 6G: visions, requirements, key technologies, and testbeds[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(2): 905-974.
- [2] TATARIA H, SHAFI M, MOLISCH A F, et al. 6G wireless systems: vision, requirements, challenges, insights, and opportunities[J]. Proceedings of the IEEE, 2021, 109(7): 1166-1199.
- [3] ITU. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond[R]. 2023.
- [4] KODHELI O, LAGUNAS E, MATURO N, et al. Satellite communications in the new space era: a survey and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(1): 70-109.
- [5] 张佳鑫. 卫星地面融合网络 技术、架构与应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2021.
ZHANG J X. Satellite ground integration network technology, architecture and application[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2021.
- [6] ZHANG J X, ZHANG X, WANG P, et al. Double-edge intelligent integrated satellite terrestrial networks[J]. China Communications, 2020, 17(9): 128-146.
- [7] 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 constella-

- tions[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15(12): 1155-1162.
- [8] 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.
- [9] MAO B M, FADLULLAH Z M, TANG F X, et al. A tensor based deep learning technique for intelligent packet routing[C]//Proceedings of the GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] DENG D X, ZHENG Z W, HUO M M. A survey: the progress of routing technology in satellite communication networks[C]//Proceedings of the 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC). Piscataway: IEEE Press, 2011: 286-291.
- [13] YANG H, GUO B L, YAN K, et al. Constellation structure design for LEO mega-constellation with optical intersatellite link[C]//Proceedings of the 2022 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1258-1261.
- [14] 王鹏, 张佳鑫, 张兴, 等. 低轨卫星智能多接入边缘计算网络: 需求、架构、机遇与挑战[J]. 移动通信, 2021, 45(5): 35-46.
- WANG P, ZHANG J X, ZHANG X, et al. Low earth orbit satellite intelligent multi-access edge computing networks: requirements, architecture, opportunities and challenges[J]. Mobile Communications, 2021, 45(5): 35-46.
- [15] 张婧阳. 低轨卫星物联网的业务建模与路由算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- ZHANG J Y. Research on service modeling and routing algorithm of LEO satellite Internet of Things[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [16] QI X X, ZHANG B, QIU Z L. A distributed survivable routing algorithm for mega-constellations with inclined orbits[J]. IEEE Access, 2020, 8: 219199-219213.
- [17] ZHANG X, YANG Y, XU M W, et al. ASER: scalable distributed routing protocol for LEO satellite networks[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 46th Conference on Local Computer Networks (LCN). Piscataway: IEEE Press, 2021: 65-72.
- [18] RUAN G H, PAN T, LU C C, et al. Lightweight route flooding via flooding topology pruning for LEO satellite networks[C]//Proceedings of the ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1149-1154.
- [19] 刘高赛, 姜兴龙, 李华旺, 等. 基于位置感知的大规模LEO星座分布式路由算法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(11): 3529-3536.
- LIU G S, JIANG X L, LI H W, et al. Large-scale LEO constellation distributed routing algorithm based on location awareness[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(11): 3529-3536.
- [20] HUSSEIN M, ABU-ISSA A, ELAYYAN I. Location-aware load balancing routing protocol for LEO satellite networks[C]//Proceedings of the 2018 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [21] KUDOH D, KASHIBUCHI K, NISHIYAMA H, et al. Dynamic load balancing method based on congestion prediction for IP/LEO satellite networks[J]. IEICE Transactions on Communications, 2009, 92(11): 3326-3334.
- [22] LIU Z L, LI J S, WANG Y R, et al. HGL: a hybrid global-local load balancing routing scheme for the Internet of Things through satellite networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2017, 13(3).
- [23] 刘子鸾. 卫星网络路由与流量控制关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- LIU Z L. Research on the key technologies of routing and traffic control for satellite network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [24] 王卫东, 王程, 王慧文, 等. 基于流量预测的物联网卫星节点动态缓存分配路由策略[J]. 通信学报, 2020, 41(2): 25-35.
- WANG W D, WANG C, WANG H W, et al. Dynamic cache allocation routing strategy of Internet of Things satellite node based on traffic prediction[J]. Journal on Communications, 2020, 41(2): 25-35.
- [25] 顿聪颖, 金凤林, 谭诗翰, 等. 基于负载均衡的低轨卫星网络动态路由算法[J]. 无线电工程, 2022, 52(5): 790-798.
- DUN C Y, JIN F L, TAN S H, et al. Dynamic routing algorithm for low orbit satellite network based on load balancing[J]. Radio Engineering, 2022, 52(5): 790-798.
- [26] LIU P L, CHEN H Y, WEI S J, et al. Hybrid-Traffic-Detour based load balancing for onboard routing in LEO satellite networks[J]. China Communications, 2018, 15(6): 28-41.
- [27] 周雅, 谢卓辰, 刘沛龙, 等. 基于区域分流的低轨卫星星座星间负载均衡路由算法[J]. 中国科学院大学学报, 2021, 38(5):

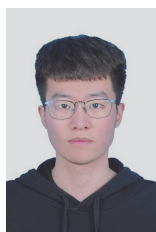
- 687-695.
- ZHOU Y, XIE Z C, LIU P L, et al. Inter-satellite load balancing routing algorithm for LEO satellite constellation based on regional-traffic-detour[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2021, 38(5): 687-695.
- [28] DAI S Y, RUI L L, CHEN S Y, et al. A distributed congestion control routing protocol based on traffic classification in LEO satellite networks[C]//Proceedings of the 2021 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM). Piscataway: IEEE Press, 2021: 523-529.
- [29] 马久龙, 齐小刚, 陈春绮. 基于拥塞避免的卫星网络路由算法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2019, 57(2): 357-362.
- MA J L, QI X G, CHEN C Q. Routing algorithm based on congestion avoidance in satellite networks[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2019, 57(2): 357-362.
- [30] 秦嘉雯. 基于故障检测的卫星网络抗毁路由研究及验证[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- QIN J W. Research and verification of satellite network anti-destructive routing based on fault detection[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [31] 贾梦瑶, 王兴伟, 张爽, 等. 基于软件定义网络的卫星网络容错路由机制[J]. 计算机应用, 2019, 39(6): 1772-1779.
- JIA M Y, WANG X W, ZHANG S, et al. Software defined network based fault tolerant routing mechanism for satellite networks[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(6): 1772-1779.
- [32] 张芳, 邓畅霖, 王之, 等. 软件定义卫星网络的链路故障检测和恢复方案[J]. 计算机科学, 2017, 44(6): 63-67.
- ZHANG F, DENG C L, WANG Z, et al. Link failure detection and fast recovery in software-defined satellite network[J]. Computer Science, 2017, 44(6): 63-67.
- [33] SONG G H, CHAO M Y, YANG B W, et al. TLR: a traffic-light-based intelligent routing strategy for NGEOS satellite IP networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(6): 3380-3393.
- [34] 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.
- [35] 张慧卿, 彭宏利. 基于 Pareto 多目标遗传的 LEO 卫星网络多业务 QoS 路由算法[J]. 电子设计工程, 2017, 25(20): 116-120.
- ZHANG H Q, PENG H L. LEO network multi-service QoS routing using Pareto multi-object genetic algorithm[J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(20): 116-120.
- [36] 石晓东, 李勇军, 赵尚弘, 等. 基于 SDN 的卫星网络多 QoS 目标优化路由算法[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(6): 1395-1401.
- SHI X D, LI Y J, ZHAO S H, et al. Multi-QoS objective optimization routing algorithm of satellite network based on SDN[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(6): 1395-1401.
- [37] 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.
- [38] PAPA A, DE COLA T, VIZARRETA P, et al. Dynamic SDN controller placement in a LEO constellation satellite network[C]//Proceedings of the 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2018: 206-212.
- [39] 袁梦珠. 基于 SDN 的卫星网络关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- YUAN M Z. Research on key technologies of SDN based satellite network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [40] LI R, ZHANG J X, ZHENG S, et al. LEO mega-constellations routing algorithm based on area segmentation[C]//Proceedings of the 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [41] JIANG Y Q, LIU Y B, WEN Y Y, et al. A clustering algorithm applied to the satellite networks management[C]//Proceedings of the Proceedings of the Fourth International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies. Piscataway: IEEE Press, 2003: 396-399.
- [42] 吴迪, 魏亿涛, 王光兴. 一种用于 MEO/LEO 卫星网络管理的分簇算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(23): 151-154.
- WU D, WEI Y T, WANG G X. Clustering algorithm for MEO/LEO satellite networks management[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(23): 151-154.
- [43] HAN C, LIU A J, HUO L Y, et al. Anti-jamming routing for Internet of satellites: a reinforcement learning approach[C]//Proceedings of the ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Piscataway: IEEE Press, 2020: 2877-2881.
- [44] ZUO P L, WANG C, YAO Z, et al. An intelligent routing algorithm for LEO satellites based on deep reinforcement learning[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.

- [45] WANG H, RAN Y Y, ZHAO L, et al. GRouting: dynamic routing for LEO satellite networks with graph-based deep reinforcement learning[C]//Proceedings of the 2021 4th International Conference on Hot Information-Centric Networking (HotICN). Piscataway: IEEE Press, 2021: 123-128.
- [46] WANG X T, DAI Z Q, XU Z. LEO satellite network routing algorithm based on reinforcement learning[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 4th International Conference on Electronics Technology (ICET). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1105-1109.
- [47] TSAI K C, FAN L, WANG L C, et al. Multi-commodity flow routing for large-scale LEO satellite networks using deep reinforcement learning[C]//Proceedings of the 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 626-631.

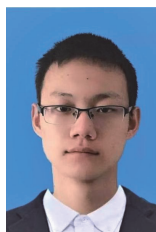
[作者简介]



张佳鑫（1990—），男，北京邮电大学信息与通信工程学院副教授、硕士生导师，主要研究方向为卫星地面融合网络、算力网络与智慧社区等。



常朝阳（2000—），男，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为大规模卫星星座组网及控制技术。



张易隆（2000—），男，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为星地融合网络。



李睿（1999—），男，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为 6G 通信与边缘计算、卫星与蜂窝通信融合。



王凯巍（1999—），女，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为 5G 边缘计算系统与应用研发、大数据及应用研发。



张兴（1980—），男，北京邮电大学信息与通信工程学院教授、博士生导师，主要研究方向为 5G /6G 移动通信系统、移动边缘计算与数据分析、卫星互联网。