

低轨卫星通信网络路由技术综述

郑爽, 张兴, 王文博

(北京邮电大学, 北京 100876)

摘要: 低轨卫星通信网络是万物互联时代的重要组成部分, 而卫星星座拓扑高动态、资源异构受限、网络服务能力不均衡等特性使得传统应用于地面网络的路由协议不再适用于低轨卫星通信网络。对此, 国内外学者展开了广泛的低轨卫星路由技术研究, 首先分别从星上路由和星地路由两方面对低轨卫星路由研究现状进行讨论, 详细梳理并对比以业务为核心和以拓扑为核心两个角度的星上路由技术。在此基础上, 分析低轨卫星路由策略面临的关键问题, 即网络拓扑高动态、星间链路传播时延大、网络负载不均匀和星上资源有限, 进而针对上述问题对低轨卫星路由技术的未来研究进行相应展望。

关键词: 低轨卫星通信网络; 路由; 业务; 拓扑结构

中图分类号: TN927.2

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022037

Survey of Low Earth Orbit Satellite Communication Network Routing Technology

ZHENG Shuang, ZHANG Xing, WANG Wenbo

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Low earth orbit satellite communication network is an important part of the internet of everything era, but the characteristics of satellite constellation topology such as high dynamic, limited heterogeneous resources and unbalanced network service capacity make the traditional routing protocol applied to the ground network no longer suitable for low earth orbit satellite network. In this regard, scholars at home and abroad had carried out extensive research on low-orbit satellite routing technology. Firstly, the research status of low-orbit satellite routing was discussed from inter-satellite routing and satellite-to-ground routing, and the inter-satellite routing technologies with business as the core and topology as the core were compared in detail. On this basis, the key problems faced by low-orbit satellite routing strategies were analyzed, namely, high dynamic network topology, large inter-satellite link propagation delay, uneven network load and limited on-board resources. The future research of routing technology was prospected accordingly.

Keywords: low earth orbit satellite communication network, routing, business, topological structure

0 引言

现阶段主要由地面设备和光纤提供网络, 地面基站因地形限制、抗毁性差等因素, 无法实现全球无缝覆盖。据国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)统计, 仍有接近全球一半人口的生活区域网络服务不可达。同时, 地面基站在地质灾害发生时容易发生损毁, 很难保障救援中的通信需求。在此条件下, 卫星通信系统具有覆盖范围广、抗毁能力强、建设周期短、服务类型全面等优点, 可以更好地服务用

户, 提供一种更泛在、可靠的无线通信服务。

由于各种卫星运行的轨道高度不同, 卫星通信大致可以区分为如下几个类别: 当某颗卫星的轨道高度与地面相差36 000 km时, 为地球同步轨道(Geostationary Orbit, GEO)的卫星通信; 当某颗卫星的轨道高度距离地面2 000~20 000 km时, 为中地球轨道(Middle Earth Orbit, MEO)的卫星通信; 当某颗卫星的轨道高度距离地面500~2 000 km时, 为低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)的卫星通信。相较于GEO、MEO卫星网络, LEO

收稿日期: 2022-04-01; **修回日期:** 2022-08-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.62071063); 国家重点研发计划资助项目(No.2020YFB1807900)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.62071063), National Key Research and Development Program of China(No.2020YFB1807900)

卫星网络具有更低的成本、更低的传输时延、更好的覆盖特性、更大的通信容量，近年来被国内外学者深入探究^[1-2]。目前，LEO卫星网络星座的研究已颇为成熟，包括铱星星座、OneWeb、GlobalStar等，我国也规划了LEO卫星通信星座部署。

LEO卫星网络架构一般如图1所示。LEO卫星网络仍存在诸多问题：虽然其“星历”规律，网络拓扑具有可预测性，但由于星地链路和星间链路通断频繁，网络拓扑仍具有高动态性；相较于地面网络，卫星网络中链路距离较远，传播时延更大；LEO卫星受限于载荷能力的制约，计算、存储和通信资源等都受限；业务在卫星网络中分布不均匀且具有差异性。现有的地面路由协议如路由信息协议（Routing Information Protocol, RIP）、开放最短路径优先（Open Shortest Path First, OSPF）等并不能解决上述问题。地面网络路由与LEO卫星路由技术对比见表1，相较于地面网络路由技术，LEO卫星网络由于网络的拓扑时变性，路由计算更为动态复杂，路由表更新更加频繁；另外，LEO卫星星上资源受限，不能存储大规模的全部路由数据，路由设计需要尽可能降低信令开销。因此，研究LEO卫星通信系统网络路由技术，即如何在满足差异化业务需求的同时，找到一条传输时延低、持续时间长、资源占用少的合适路径，是解决LEO卫星网络问题的关键^[3]。

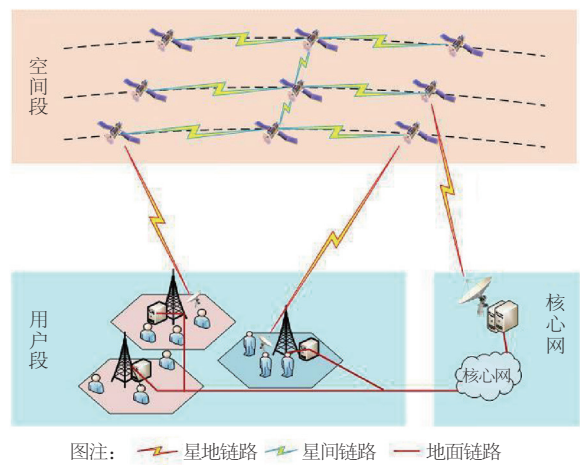


图1 LEO卫星网络架构

表1 地面网络路由与LEO卫星路由技术对比

路由技术	路由计算	路由表更新	数据存储	信令开销
地面网络路由技术	稳定	周期更新	大规模	要求较弱
LEO卫星路由技术	动态复杂	频繁更新	小规模	尽可能降低

1 LEO卫星网络路由技术研究现状

考虑到LEO卫星通信链路特性，将LEO卫星网络路由技术划分为星上路由和星地路由两个研究方向。现有的LEO卫星路由研究集中在星上路由，从不同角度出发，将星上路由技术分为以业务为核心^[4]的星上路由技术和以拓扑为核心^[5]的星上路由技术。而针对星地路由技术，即卫星与地面网关之间的路由设计，研究相对较少。本节将分别讨论上述两个研究方向。

1.1 星上路由技术

不同学者从不同角度对LEO卫星路由技术进行分类。例如：参考文献[6]根据卫星之间进行数据传输之前是否需要建立连接，将路由分为面向连接和面向无连接的路由；参考文献[7]根据卫星路由决策方式不同，将路由分为集中式和分布式路由。本文主要从以业务为核心和以拓扑为核心两个角度介绍LEO卫星网络星上路由技术，如图2所示。

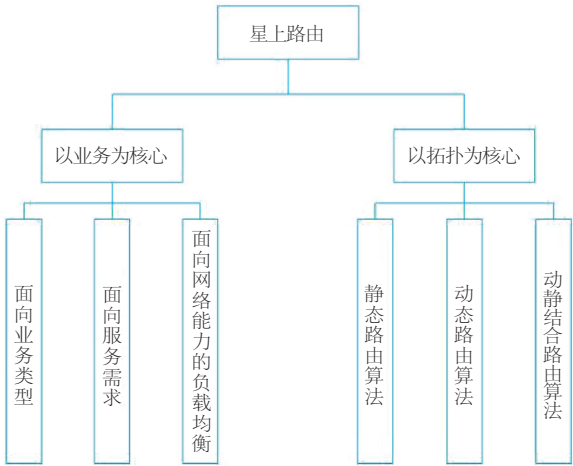


图2 星上路由技术分类

(1) 以业务为核心的星上路由技术

为适应不同种类业务请求，提供多功能服务，设计面向业务类型的星上路由技术，研究面向服务需求的星上路由技术，应对业务的差异化服务需求。另外，为应对多样的LEO卫星网络状态，研究面向网络能力的负载均衡星上路由技术。以业务为核心的星上路由技术在当下被广泛关注，具体介绍如下，部分研究对比见表2。

根据不同的业务类型，可将现有的星上路由技术分为单播路由算法、组播路由算法以及基于多协议标签交换（Multi-Protocol Label Switching, MPLS）路由算法3类。

单播通信负责实现点到点的单条或者多条链路通信，在通信中占据最大的比例，是LEO卫星通信的主要业务。相应地，单播星上路由研究在业内已颇具基础^[8-9]。

表2 以业务为核心的星上路由技术对比

技术分类	方法	备选路径	是否考虑链路状态	优化目标	特点
面向业务类型	WCSSM ^[13]	无	是	时延	自适应调整加权因子
	基于MPLS路由算法 ^[15]	无	是	带宽利用率	融合IP和ATM两种技术
面向服务需求	DOAR ^[16]	有	是	带宽利用率	主动式路由
	SOR-MSG ^[18]	有	是	多QoS	满足多业务需求
	ADR ^[19]	无	是	流量	漫游代理和固定代理交互
面向网络能力的负载均衡	TLR ^[23]	有	是	丢包率、时延	结合预测，拥塞反应快
	NCMCR ^[24]	有	否	吞吐量	多条路径协同传输
	HGL ^[25]	无	是	吞吐量	区分区域和长、短距离流

组播路由算法的核心是构建一个组播树，数据仅在组播树的分支节点进行拷贝，进一步划分为基于源的树^[10]和基于核的树^[11]。借鉴地面路由协议，按照不同的应用范围，可将星上组播路由协议分为密集模式协议、稀疏模式协议和链路状态协议。MA等^[12]提出了一种高性能的LEO卫星网络组播路由方案，利用组内成员的地理信息优化路由性能。LIU等^[13]设计了一种基于核的加权源特定组播（Core Cluster Based Source Specific Multicast, WCSSM）算法，权衡端到端时延组播树代价。

MPLS技术中，互联网协议（Internet Protocol, IP）层的路由参数映射到链路层可以理解的信息，并用标记标识业务流，解决了IP协议和承载网络的交互问题。基于MPLS的路由算法根据卫星特点以及MPLS协议内容，将该算法拆分为网络状态模块、用户需求/QoS保证模块、路由计算模块及标签交换路径（Label Switched Path, LSP）的重路由/创建/释放模块^[14]。潘成胜等^[15]基于MPLS路由协议，提出一种基于跳数和带宽利用率率的算法。

(2) 面向服务需求的星上路由技术

随着互联网业务的不断丰富，用户对于业务的服务需求日渐复杂多样，接下来将从时延、带宽、可靠性3个方面用户的服务需求分析星上路由技术。

针对时延服务，用户已不再只满足于时延保障服务，时延敏感业务已经占据主要地位。基于时延敏感服务的路由算法在考虑传播时延的同时，结合分析其他类型时延对服务的影响。LIU等^[16]提出了面向时延的自适应路由（Delay-Oriented Adaptive Routing, DOAR）算法，采用目标序列距离矢量路由技术，提升时延敏感流量性能。参考文献[17]在路由算法的设计中同时涉及了传播时延和排队时延。

针对带宽服务，LEO卫星路由的研究通常是以在剩余带宽条件下满足最小要求为目标，联合其他服务需求共同优化路由算法性能，从而降低该业务对于其他业务带宽上的影响，如面向服务的基于马尔可夫时空图的路

由^[18]（Service-Oriented Routing with Markov Space-Time Graph, SOR-MSG）和基于代理的动态路由^[19]（Agent-Based Dynamic Routing, ADR）。

针对可靠性服务，LEO卫星路由算法实时收集链路状态信息，反应速度更快。TALEB等^[20]采用明确的相邻卫星间拥塞状态信息交换方法，卫星将拥塞状态发送给临近卫星，避免了路径的拥塞和丢包。

(3) 面向网络能力的负载均衡星上路由技术

考虑到LEO卫星网络具有业务分布不均衡的特点，研究人员提出了一些负载均衡星上路由技术，主要包括全局方案、局部方案以及全局-局部结合方案。

针对全局方案，结合网络全局负载状态信息，决策星上路由。参考文献[21]在选择性迭代Dijkstra算法基础上提出一种选择性分流的全局负载均衡策略解决低纬度LEO卫星网络中链路拥塞问题。LI等^[22]提出一种定量估计网络全局链路状态和动态调整排队时延权重的机制，在两次切换之间高效动态更新路由表，大大降低路由开销。

针对局部方案，采用被动或者主动的方式通知相邻卫星拥塞状态，在实际链路状况下进行拥塞避免。参考文献[23]中的基于交通灯的智能路由（Traffic-Light-Based Intelligent Routing, TLR）算法能够感知当前节点和下一跳节点的拥塞状态，通过前期规划和实时调整相结合，得到近似最优的传输路径。参考文献[24]研究基于网络编码的多路径路由（Network Coding Based Multipath Cooperative Routing, NCMCR）算法，数据流能够在多条链路上动态、协同传输。

考虑到全局方案反应速度慢且全局视图具有时效性、信令开销大，而局部方案缺乏全局视图而容易陷入局部最优，存在级联拥塞方案，因此结合二者优点，一种全局-局部结合负载（Hybrid Global-Local Load Balancing, HGL）路由算法随之出现^[25]。该算法可实现信令交互与网络拥塞之间的权衡，定时采集LEO卫星网络全局信息，实时感知局部信息。

(2) 以拓扑为核心的星上路由技术

LEO卫星网络中卫星节点周期性运动，拓扑结构不断变化，但同时具有可预测性。针对这一特性，众多学者以拓扑为核心对LEO卫星路由进行分类：静态路由算法不考虑网络拓扑结构的变化，在时间和空间上对卫星网络进行划分。动态路由算法由网络中信息传递实时计算和更新路由表，灵活适应网络拓扑和负载变化。结合以上两种情况，既依赖LEO卫星网络拓扑的时变性，又基于拓扑周期可预测性设计动静结合路由技术^[26]。以拓扑为核心的星上路由技术具体介绍如下，部分研究对比见表3。

静态路由算法对LEO卫星网络在时空域上进行划分，能够屏蔽网络拓扑的动态特性，一般可以分为以下3类：虚拟拓扑表示卫星拓扑在短时间内保持不变，在卫星运行过程中可以被提前计算，并呈周期性变化^[27-28]；虚拟节点表示根据地理位置将每颗卫星统一分配地址，将空间卫星逻辑转化为基站固定逻辑，如参考文献[29]中接触图路由（Contact Graph Routing, CGR）算法和参考文献[30]中的分组路由算法；覆盖区域划分表示制定区域划分规则，将地球表面划分为多块固定区域，使用户能够集中在固定逻辑编号下，并且将地面网络逻辑编号信息上注到卫星，如分布式地理路由算法^[31]（Distribute Geographic Routing Algorithm, DGRA）。

动态路由算法获知卫星网络的实时状态信息，并将路由算法不断优化，提出基于卫星拓扑动态性及可预测性的路由算法。参考文献[32]基于拥塞控制，设计了一种基于拥塞预测QoS感知路由，以同时适应实时和非实时流量，有效提高卫星网络的效率，提升用户的QoS满意度。参考文献[33]提出了基于优先级的自适应最短路径路由（Priority-Based Adaptive Shortest Path Routing, PAR），其参数需要根据网络和流量特性进行调整，高效利用卫星间的多条最短路径，提高系统性能。

在静态路由和动态路由的基础上，已有研究人员提出了动静结合的路由策略，即静态路由和动态路由一种或多种的结合。基于路由负载预测多路径（Predicted Load Based Multi-Path, PLMP）路由算法在LEO卫星网络

星间链路通断状态发生变化时，对比当前时刻快照：结果相同时，即当前卫星网络拓扑与快照相符时，采用静态路由策略；反之，卫星切换到动态路由协议^[5]。当某些星间链路出现长期故障，将在全周期所有快照中标记链路永久故障重新进行路由表计算。FISCHER等^[34]提出了可预测链路状态路由（Predictable Link-State Routing, PLSR）算法，该算法既考虑了突发的、不可预测的变化发生，又考虑了其可与可预测变化的交互。将可预测的动态拓扑表示为静态快照序列，结合动态链路状态算法，优化LEO卫星网络路由策略。

1.2 星地路由技术

在LEO卫星通信网络中，星地路由技术主要包括星地边界路由和星地接入路由。星地边界路由保证了卫星网络和地面网络之间信息交换的可靠性、高效性和无缝连接，实现了星地融合网络的互操作性。地面的用户和信关站通过星地接入路由与卫星通信，由于多颗卫星之间存在覆盖区域的重叠，地面用户和信关站可以与多颗卫星建立连接，因此需要选择最合适的卫星进行通信。不同于星上路由，卫星与地面用户和信关站之间的星地链路切换频繁，星地路由需要区别研究，但目前，星地路由技术的研究相对较少。

参考文献[35]主要讨论了星地路由技术中的路由计算，包括星地覆盖规律计算和卫星选取两个主要内容。星地覆盖规律计算需要考虑星下点轨迹和覆盖半径，分析LEO卫星的单颗星覆盖时间和整个LEO卫星系统对地面站覆盖规律；卫星选取准则主要有最长覆盖时间准则、最大仰角准则、最强信号准则、最小负载准则及最短传播路径准则。

为了更好地融合LEO卫星网络与地面网络的优势，参考文献[36]提出信关站合并机制，基于就近原则，更快地将业务转发到地面，保障卫星资源的及时释放。参考文献[37]提出了一种LEO卫星通信网络中基于移动终端潜在博弈的卫星切换策略，有效利用网络资源并降低切换时间，为了平衡LEO卫星网络的负载并且保持连续通

表3 以拓扑为核心的星上路由技术对比

技术分类	方法	备选路径	是否考虑链路状态	优化目标	特点
静态路由	CGR ^[29]	无	否	时延	动态响应卫星DTN拓扑变化
	DGRA ^[31]	无	否	路径距离	地理信息嵌入节点地址
动态路由	基于拥塞预测QoS感知路由 ^[32]	无	是	时延	流量绕行系数自适应调整
	PAR ^[33]	无	是	时延	小范围拥塞适用，拥塞反应快
动静结合路由	PLMP ^[5]	有	是	时延	结合当前和下一跳节点拥塞状态
	PLSR ^[34]	无	是	时延	预测信息和实时状态相结合

信,进而提出了一种基于用户空间最大化目标的终端随机接入算法。

2 LEO卫星路由关键问题

由于LEO卫星网络具有高度动态变化、业务分布不均匀、卫星节点受限等特性,已有许多学者基于网络拓扑高动态性、星间链路传播时延大、网络负载不均匀、星上资源有限4个关键问题展开了一系列研究。本节将对4个关键问题分别展开讨论。

2.1 LEO卫星网络拓扑高动态性

LEO卫星相对地面用户设备移动速度高,覆盖的地面终端在不断发生变化。对于地面终端而言,每颗LEO卫星的可视时间有限,卫星节点高动态引起的星地链路频繁通断,导致星地路由需频繁重计算和重收敛。另外,卫星经过极区前后,星间链路存在主动通断的问题,星间网络拓扑高动态引起星间拓扑频繁变化,导致星间路由需频繁重计算和重收敛^[38]。LEO卫星网络面临的关键问题之一是网络拓扑的高动态性,且其拓扑变化又具有一定的规律性,充分利用该规律,可以提高路由策略的效率。

YUE等^[39]采用基于链路剩余时间的星间链路切换管理方案,预测星间链路的剩余时间,改变数据传输路径,防止数据包进入即将失效的链路,保证LEO卫星网络的QoS;王璇等^[40]针对LEO卫星拓扑的高动态性,根据卫星的可预测性获得星间链路可用时间进而计算当前路径的可用寿命,在当前路径失效之前触发路由重构,避免路由重构中耗时长、数据丢失等问题。参考文献[41]同样基于卫星拓扑的可预测性,引入继承协作卫星,如果当前协作卫星不能覆盖地面站,若原路径中包含继承协作卫星,则能够继续与地面站通信,传输过程不中断,避免路径重构,保持路径的有效性。

2.2 LEO卫星星间链路传播时延大

LEO卫星网络中星间链路一跳距离很大,远超地面终端之间的平均距离。星间链路传播时延不能够简化忽略,更成为LEO卫星网络中端到端时延的重要组成部分。典型的星间链路一跳传播时延为几十毫秒,因此,卫星路由设计应考虑如何尽可能降低路由跳数。

雷援杰等^[42]采用改进广度优先搜索算法,即利用LEO卫星网络拓扑呈二维网络拓扑的特征,选择最小跳数路径集合,进而以传输时延和传播时延为衡量指标,在最小跳数集合中获得最小权值路径,有效降低平均时延。参考文献[15]在融合IP和ATM两种技术体制中,提出

一种基于路由跳数和带宽利用率的路径选择算法,降低传播时延,能够更为合理地选择传输路径。参考文献[43]以最小路由跳数为优化准则,设计基于深度强化学习的低轨卫星路由策略,提高LEO卫星网络实时处理业务的能力。

2.3 LEO卫星网络负载不均匀

LEO卫星网络需要承载全球通信,而不同区域的人口密度、不同国家的用户需求具有较大的差异性。这使得卫星网络的资源利用不均匀,需要借助有效的负载均衡技术来解决这一问题。

LIU等^[44]提出一种基于分段路由的流量回程路由算法,动态划分轻载区和重载区,轻载区采用预平衡最短路径算法,重载区采用最小拥塞指数值路径算法,能够有效提升LEO卫星网络负载性能。参考文献[45]针对分布式负载均衡路由方案缺乏全局视野导致该流量区域级联拥塞的问题,提出一种基于混合流量绕行的负载均衡路由方案,转发路径基于先验信息获取,实时拥塞感知激活,从而缓解级联拥塞,实现高效路由传输。杨明川等^[46]提出一种包含邻居卫星负载状态更新、负载均衡和路由判决等机制的基于邻居卫星负载状态的分布式路由算法,能够适应LEO卫星网络负载的变化,缓解卫星拥塞的网络状况并获得较低的时延和较小的丢包率。

2.4 LEO卫星网络星上资源有限

受限于现阶段硬件发展水平,LEO卫星能力严格受到功率、重量、尺寸等因素限制。卫星发射后,一般不会进行设备更新,星上通信、存储及计算所需能量全部来自太阳能供电板转化的电能。相比地面设备,星上计算处理资源、存储容量等都十分有限。同时,当前的技术体制仍不成熟,稳定性和可靠性较差。虽然目前存在大量的LEO卫星路由理论研究,但工程应用上受到星上资源有限的制约,因此,LEO卫星路由设计应该尽量降低额外开销。

参考文献[47]考虑到星上有限的存储和计算资源,提出一种基于软件定义网络(Software Defined Network, SDN)的高效星间路由算法,有效避开拥塞节点,高效快速进行路由转发,该算法复杂度低,极大节省了星上存储资源与计算资源。参考文献[48]提出一种基于位置的星间路由技术,路由计算选择最优的转发接口,而不存在路由更新包交换开销和邻居通信开销,同时显著降低了星上路由表的存储开销。童文婷等^[49]结合卫星网络拓扑可预测性和地面终端动态性的特点,在动态路由计算过程中关联静态可预测信息,降低路由的计算开销。

3 LEO卫星路由技术展望

3.1 差异化业务LEO卫星路由机制

随着无线通信技术的不断发展,LEO卫星网络需要承载的业务类型复杂多样,用户请求不断增多,业务流量也不断增大。这使得LEO卫星路由研究需要应对多种可能的网络状况,在保证时延、带宽、吞吐量等多样化服务需求的同时,能够动态适应差异化业务请求。微服务架构能够对LEO卫星网络中不同种类、不同服务需求的业务请求相应的特征进行粒度拆分,松耦合不同的业务特征。基于简单灵活的微服务架构,进一步设计切片资源配置方案与智能切片映射方法,为差异化业务LEO卫星路由开辟一条新的研究道路。

3.2 巨型LEO卫星星座路由技术

近些年来,卫星网络的空间规模趋于多层次化,部署趋于规模化,SpaceX、OneWeb以及亚马逊公司相继提出了各自的巨型星座计划。截至2020年年底,SpaceX公司的星链项目已经完成了几千颗卫星的部署,同时能够提供比较基础的互联网服务。巨型LEO星座系统的出现,也会对LEO卫星路由协议的设计带来一系列的挑战,比如:静态路由协议的存储开销极大增加,动态路由协议的收敛时间较长无法容忍,路由决策无法实时适配复杂多变的巨型星座网络环境,路由信令开销较大等。因此,解决巨型LEO卫星星座路由技术理论与工程结合的问题应该考虑动静结合路由协议,实现在提升网络覆盖能力的同时,进一步提升网络性能。

3.3 基于网络可扩展性的卫星路由技术

下一代大规模LEO卫星通信系统星座建设周期长,并不会选择将卫星一次性发射上天,而是有计划、逐批次进行组网,最终实现全面运营。因此,考虑到卫星节点数目的逐步变化,需要在星座建设前期规划网络的可扩展性。相对于收集、处理全局网络状态的集中式架构,LEO卫星节点定期交互信息的分布式架构具有更好的灵活性和容错能力。同时,考虑到板载能力的不断发展,卫星节点计算能力也会不断演进,是分布式的LEO卫星路由技术未来的发展趋势之一。

3.4 星地融合网络的路由技术

随着智能终端设备和移动互联网的飞速发展,用户对于高速可靠、无缝覆盖的通信服务需求日益强烈,《6G总体愿景与潜在关键技术白皮书》中明确指出要实现“全球无缝覆盖”,并构建“普惠智能的人类社会”,星地融合网络是实现这个目标的关键依托。星地

融合网络需要以地面网络为主体,以天基网络为补充,实现天地互联的架构设计。研究星地融合网络中的路由技术,首先要考虑星地链路传播时延,设计信关站的位置和接入卫星的选择;另外,卫星网络与地面网络的传输特性差异较大,在星地融合网络中如何提供一类能够克服大多普勒频移以及星地链路频繁切换等问题的路由策略,成为下一代网络技术的研究重点。

3.5 基于SDN的LEO卫星路由研究

SDN作为下一代网络体系的重要架构,通过软件编程的形式定义和控制网络,使控制平面和数据平面分离并开放可编程。SDN技术对于LEO卫星网络而言,能够通过中央控制器集中收集卫星节点和星间链路的实时通断状态,并获得卫星网络的全局视图,从而获知整个LEO卫星网络的变化情况。基于SDN架构的LEO卫星网络系统能够灵活进行网络部署和资源调度,降低了卫星的制造成本以及对星载能力的要求。但由于业务在地理上分布不均匀、SDN中央控制器所处的地理位置、地形、天气等影响路径传输质量等原因,如何设计基于SDN的LEO卫星网络中央控制器的位置,在实时监控网络全局状态的同时尽可能保障网络的服务质量是一个值得深入探究的研究方向。

3.6 人工智能在LEO卫星路由中的应用

人工智能技术一直在稳步发展,并能够有效解决无线通信领域的相关问题。LEO卫星路由一般可以建模为多目标优化模型,算法的计算复杂度随着卫星节点个数的增多而增大,传统的路由算法解决这类NP难问题很难在LEO卫星网络场景中获得较好的效果。采用人工智能技术能够有效提取卫星网络特征并且通过学习生成相应的卫星路由策略。考虑到LEO卫星网络拓扑复杂多变,为了使卫星节点及时获知路由策略的更新,基于人工智能技术的卫星路由算法生成结果不应存在强滞后性。因此,优化收敛速度的人工智能LEO卫星路由算法是人工智能在LEO卫星路由未来的研究方向之一。

参考文献:

- [1] 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.

- [2] WANG Z, ZHANG J X, ZHANG X, et al. Reinforcement learning based congestion control in satellite Internet of Things[C]// Proceedings of 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [3] 朱晓攀. 大规模低轨宽带卫星网络路由关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2020.
- ZHU X P. Research on key routing technologies of large-scale low earth orbit broadband satellite network[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [4] 刘姜旺. 低轨卫星网络高效路由关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- LIU J W. Research on key technologies of efficient routing in low-orbit satellite network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [5] 李顺. LEO卫星网络路由策略设计与性能分析[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- LI S. LEO satellite network routing strategy design and performance analysis[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [6] 白建军, 卢泽新, 彭伟. 具有星间链路的卫星星座网络路由技术研究[J]. 小型微型计算机系统, 2005, 26(10): 1687-1692.
- BAI J J, LU Z X, PENG W. Research of routing techniques in satellite networks with ISLs[J]. Mini-Micro Systems, 2005, 26(10): 1687-1692.
- [7] LU Y, ZHAO Y J, SUN F C, et al. A survivable routing protocol for two-layered LEO/MEO satellite networks[J]. Wireless Networks, 2014, 20(5): 871-887.
- [8] KIM Y S, BAE Y H, KIM Y, et al. Traffic load balancing in low Earth orbit satellite networks[C]//Proceedings of Proceedings 7th International Conference on Computer Communications and Networks (Cat. No.98EX226). Piscataway: IEEE Press, 1998: 191-195.
- [9] GOUNDER V V, PRAKASH R, ABU-AMARA H. Routing in LEO-based satellite networks[C]//Proceedings of 1999 IEEE Emerging Technologies Symposium. Wireless Communications and Systems. Piscataway: IEEE Press, 1999.
- [10] UMAR D S, ESHIGUIKE D E C, ANYE D V C, et al. Reliable delivery of point-to-multi point services via satellite (multicast & broadcast): requirements and solutions[J]. Science, 2019, 4(2): 482-486.
- [11] CHENG L Z, ZHANG J, LIU K. Core-based shared tree multicast routing algorithms for LEO satellite IP networks[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20(4): 353-361.
- [12] MA Y, SU J, WU C, et al. A source-based share-tree like multicast routing in satellite constellation networks[C]// Third Ftra International Conference on Mobile. Piscataway: IEEE Press, 2012.
- [13] LIU K, CHENG L Z, ZHANG J. Efficient multicast routing for LEO satellite IP networks[C]//Proceedings of 2009 IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-5.
- [14] DONNER A, BERIOLI M, WERNER M. MPLS-based satellite constellation networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(3): 438-448.
- [15] 潘成胜, 贾亚茹, 蔡睿妍, 等. 基于MPLS的空间信息网络路由策略[J]. 计算机工程, 2019, 45(3): 85-90.
- PAN C S, JIA Y R, CAI R Y, et al. Routing strategy for spatial information network based on MPLS[J]. Computer Engineering, 2019, 45(3): 85-90.
- [16] LIU L, ZHANG T, LU Y. A novel adaptive routing algorithm for delay-sensitive service in multihop LEO satellite network[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS), 2016(8):3551-3567.
- [17] 饶元. 基于代理的LEO卫星网动态路由技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2011.
- RAO Y. Research on agent-based low earth orbit satellite network dynamic routing[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2011.
- [18] DAI C Q, LIAO G Y, CHEN Q B. Service-oriented routing with Markov space-time graph in low earth orbit satellite networks[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2021, 32(7).
- [19] WU Z F, HU G Y, JIN F L, et al. Agent-based dynamic routing in the packet-switched LEO satellite networks[C]//Proceedings of 2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [20] TALEB T, MASHIMO D, JAMALIPOUR A, et al. Explicit load balancing technique for N GEO satellite IP networks with on-board processing capabilities[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 17(1): 281-293.
- [21] LIU J, LUO R Z, HUANG T, et al. A load balancing routing strategy for LEO satellite network[J]. IEEE Access, 2020, 8: 155136-155144.
- [22] LI X, TANG F L, CHEN L, et al. A state-aware and load-balanced routing model for LEO satellite networks[C]//Proceedings of GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.

- [23] SONG G H, CHAO M Y, YANG B W, et al. TLR: a traffic-light-based intelligent routing strategy for N GEO satellite IP networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(6): 3380-3393.
- [24] TANG F L, ZHANG H T, YANG L T. Multipath cooperative routing with efficient acknowledgement for LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 18(1): 179-192.
- [25] LIU Z, LI J, WANG Y, et al. HGL: a hybrid global-local load balancing routing scheme for the Internet of Things through satellite networks[Z]. 2017.
- [26] 邢川, 陈二虎, 韩笑冬. 基于动静结合方法的卫星网络路由方法研究[J]. 空间控制技术与应用, 2020, 46(3): 55-59.
- XING C, CHEN E H, HAN X D. Static-dynamic routing algorithm in satellite constellation network[J]. Aerospace Control and Application, 2020, 46(3): 55-59.
- [27] 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.
- [28] TAN H C, ZHU L D. A novel routing algorithm based on virtual topology snapshot in LEO satellite networks[C]//Proceedings of 2014 IEEE 17th International Conference on Computational Science and Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2014: 357-361.
- [29] FRAIRE J A, MADOERY P, BURLEIGH S, et al. Assessing contact graph routing performance and reliability in distributed satellite constellations[J]. Journal of Computer Networks and Communications, 2017.
- [30] WANG K D, YI K C, TIAN B, et al. Packet routing algorithm for polar orbit LEO satellite constellation network[J]. Science in China Series F, 2006, 49(1): 103-127.
- [31] HENDERSON T R, KATZ R H. On distributed, geographic-based packet routing for LEO satellite networks[C]//Proceedings of Globecom '00 - IEEE. Global Telecommunications Conference. Conference Record (Cat. No.00CH37137). Piscataway: IEEE Press, 2000: 1119-1123.
- [32] NISHIYAMA H, KUDOH D, KATO N, et al. Load balancing and QoS provisioning based on congestion prediction for GEO/LEO hybrid satellite networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 1998-2007.
- [33] KORÇAK Ö, ALAGÖZ F, JAMALIPOUR A. Priority-based adaptive routing in N GEO satellite networks[J]. International Journal of Communication Systems, 2007, 20(3): 313-333.
- [34] FISCHER D, BASIN D, ECKSTEIN K, et al. Predictable mobile routing for spacecraft networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(6): 1174-1187.
- [35] 张晓娜, 张亚生, 何辞. 基于低轨星座的星地路由技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(10): 264-267.
- ZHANG X N, ZHANG Y S, HE C. Research on routing between satellite and gateway station based on low-orbit constellations[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(10): 264-267.
- [36] 陈含依. LEO卫星星座空间网络路由机制研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- CHEN H Y. Research on LEO satellite constellation space network routing mechanisms[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [37] WU Y, HU G Y, JIN F L, et al. A satellite handover strategy based on the potential game in LEO satellite networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 133641-133652.
- [38] 何辞, 张亚生, 孙晨华, 等. 低轨星座组网及地面IP路由技术适应性分析[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 36-41.
- HE C, ZHANG Y S, SUN C H, et al. Analysis on low-earth-orbit constellation networking and adaptability of ground IP routing technology[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 36-41.
- [39] YUE P C, QU H, ZHAO J H, et al. An inter satellite link handover management scheme based on link remaining time[C]//Proceedings of 2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1799-1803.
- [40] 王璇, 侯蓉晖, 徐伟琳. 低轨卫星网络动态路径切换技术[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(2): 80-86.
- WANG X, HOU R H, XU W L. Dynamic path switching technology for LEO satellite networks[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(2): 80-86.
- [41] 毕梦格. 低轨卫星网络路由技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- BI M G. Research on routing technology of LEO satellite network[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [42] 雷援杰, 唐宏, 马枢清, 等. 面向LEO卫星网络的高效路由算法[J]. 电讯技术, 2021, 61(6): 710-715.
- LEI Y J, TANG H, MA S Q, et al. An efficient routing algorithm for LEO satellite networks[J]. Telecommunication Engineering, 2021, 61(6): 710-715.
- [43] 王慧文. 基于深度强化学习的低轨卫星路由策略研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- WANG H W. Routing strategy for LEO satellite network based on deep reinforcement learning[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [44] LIU W, TAO Y, LIU L. Load-balancing routing algorithm based on segment routing for traffic return in LEO satellite networks[J].

- IEEE Access, 2019, 7: 112044-112053.
- [45] 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.
- [46] 杨明川, 薛冠昌, 李清毅. 基于邻居卫星负载状态的低轨卫星分布式路由算法[J]. 通信学报, 2021, 42(8): 43-51.
- YANG M C, XUE G C, LI Q Y. Neighbor satellite load based low orbit satellite distributed routing algorithm[J]. Journal on Communications, 2021, 42(8): 43-51.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 童文婷, 黄圣春, 王玲. 基于虚拟拓扑的低轨卫星路由切换算法

仿真[J]. 计算机仿真, 2021, 38(9): 31-34.

TONG W T, HUANG S C, WANG L. Simulation of LEO satellite route switching algorithm based on virtual topology[J]. Computer Simulation, 2021, 38(9): 31-34.

[作者简介]



郑爽（1999-），女，北京邮电大学博士生，主要研究方向为卫星互联网、多接入移动边缘计算。



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。



王文博（1965-），男，北京邮电大学副校长，主要研究方向为无线传输技术、无线网络理论、无线信号处理。