

低轨卫星星座网络路由新方法

董超颖 续欣 刘爱军 苒敬辉

陆军工程大学通信工程学院 南京 210000

(vuvv25vv@163.com)



摘要 低轨卫星星座具有传输时延低、传播损耗小和覆盖区域广等特点,是卫星通信领域的热门研究方向之一。星座路由技术作为低轨卫星星座网络的核心技术之一,引起了人们的广泛关注。近年来,为进一步满足不断涌现的大容量、高效率和高服务质量的卫星通信业务传输需求,出现了诸多研究成果,主要包括:基于人工智能的 QoS 星座路由算法、多层卫星星座路由算法和低轨星座多径路由算法。文中对近期国内外低轨卫星星座路由算法的前沿成果进行了归纳总结;对比分析了当前已有算法在计算复杂度、满足业务服务质量(Quality of Service, QoS)和拥塞控制 3 个方面的优化;针对未来的星座网络面临的业务需求,对未来的研究方向进行了展望。

关键词: 低轨卫星星座;路由算法;QoS;人工智能算法;多层卫星网络;多径路由

中图分类号 TN927

New Routing Methods of LEO Satellite Networks

DONG Chao-ying, XU Xin, LIU Ai-jun and CHANG Jing-hui

School of Communication Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210000, China

Abstract The Low-orbit satellite constellation has the characteristics of low transmission delay, small propagation loss, and wide coverage area. It is one of the hot research directions in the field of satellite communications. Constellation routing technology, as one of the core technologies of low-orbit satellite constellation networks, has attracted widespread attention and research. In recent years, in order to further meet the emerging transmission needs of satellite communications services with large capacity, high efficiency and high quality of service, many research results have been proposed, including: Artificial intelligence-based QoS constellation routing algorithms, Multilayer satellite constellation routing algorithms and Low-orbit constellation multipath routing algorithm. This article summarizes the recent advances in the routing algorithms of low-orbit satellite constellations at home and abroad; compares and analyzes the optimization of the algorithm in terms of computational complexity, meeting service QoS and congestion control; according to the business needs of future constellation networks, the research direction is prospected.

Keywords LEO satellite constellation, Routing algorithm, QoS, Artificial intelligence algorithm, Multilayer satellite network, Multipath routing

1 引言

卫星通信^[1]具有广域覆盖、灵活接入和受地理环境影响小等特点,是对地面通信网络的有力补充。随着技术的进步与发展,低轨(Low Earth Orbit satellite, LEO)卫星星座,例如 Iridium^[2], Teledesic^[3]等卫星系统已经可以实现无缝覆盖的全球通信。然而,近年来天地一体化、5G 等系统的快速发展和广泛应用,对 LEO 卫星星座网络的传输性能提出了更高的要求,以往的 LEO 卫星网络在组成结构及路由机制上已经越来越难以满足这些需求。为了增强卫星网络的性能,人们对 LEO 卫星星座路由算法进行了广泛和深入的研究,尤其是在

基于人工智能的 QoS 路由算法、多层卫星星座路由算法和低轨星座多径路由算法 3 个方面提出了诸多改进方法。

2 基于人工智能的 QoS 路由算法

对于一个典型的 LEO 卫星星座而言,网络拓扑具有可预测性、周期性和规则性等特点。针对这些特性, Werner^[4]提出了基于快照的路由算法,即时间虚拟化。该算法将星座的完整时间周期划分为多个时间片,假设每个时间片中星座拓扑保持不变,采用经典的最短路径算法^[5]完成路由计算。Chang 等也在虚拟拓扑的基础上提出了不同的算法^[6-9]。但是这种业务统一处理、集中式计算的路由方式的服务质量有限,灵活性

到稿日期:2019-06-04 返修日期:2019-10-14 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金(61901516);江苏省自然科学基金(BK20180578, BK20192002);中国博士后科学基金(2019M651648)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61901516), Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (BK20180578, BK20192002) and China Postdoctoral Science Foundation (2019M651648).

通信作者:刘爱军(liuaj.cn@163.com)

和鲁棒性较差,难以满足用户多种类业务的传输需求。为此,

人们提出了一些能够提供 QoS 保障的路由算法,如图 1 所示。

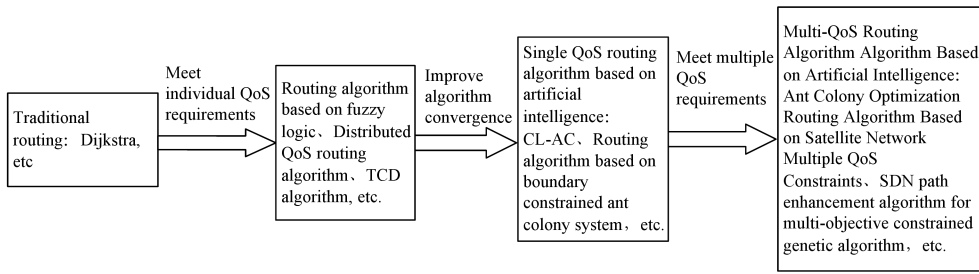


图 1 基于人工智能的 QoS 路由算法

Fig. 1 QoS routing algorithm based on artificial intelligence

在满足 QoS 需求的星座路由算法方面, Jiang 等^[10]提出了基于模糊逻辑的路由算法,通过模糊逻辑算法来判断当前卫星节点的拥塞程度,然后针对用户需求进行 QoS 路由选择。Mohoricic 等^[11]提出了 TCD 算法,按照对 QoS 的不同需求对业务进行分类:A 类业务是时延敏感业务;B 类业务是带宽敏感业务;C 类业务是没有具体 QoS 需求的业务。对每一类业务维护一种路由表,可以针对不同业务需求提供不同的路径选择。Nquyen 等^[12]提出了分布式 QoS 路由算法,其以链路的持续有效时间为链路代价,以最小链路切换次数为目标,考虑了链路最大持续时间和最小跳数两种不同的路由策略,改善了在最大持续有效时间条件下的 QoS 性能。

这些算法虽然能不同程度地满足业务的 QoS 需求^[13],但是都属于 NP 问题,计算复杂度会随着网络规模的增加而增加。为此,人们开始利用人工智能方法,如遗传算法、退火算法^[14]、蚂蚁算法、深度学习算法等,对 LEO 星座网络路由方法进行优化,使得算法在搜索能力、收敛速度等方面有较为明显的提高,使网络性能得到很大提升^[15-17]。例如,基于跨层设计的蚂蚁路由算法^[18]、基于边界制约蚁群系统的路由算法^[19]等可以在改善网络性能的同时,加快收敛速度,增强搜索能力。

但是,已提出的许多星座网络 QoS 路由算法都只实现了单个 QoS 指标的优化^[20-21]。随着通信业务量和业务种类的不断增长,人们对星座网络提出了更多样化的多目标 QoS 要求^[22-23],因此路由算法面临着新的挑战。为此,Wei 等^[24]提出了基于卫星网络多 QoS 约束的蚁群优化路由算法,对蚁群算法的启发函数提出了多个条件约束,将链路 QoS 信息作为选择下一跳的依据,将蚁群算法和多 QoS 路由相结合,在提供多目标 QoS 保障的同时,提高了收敛速度和寻优能力。Zhou 等^[25]提出了多目标 QoS 约束遗传算法的 SDN 路径增强算法,通过改进遗传算法的初始种群生成方法,使初始路径满足大部分的约束条件,显著提高了搜索效率;其同时提出了启发式交叉策略,加快了算法的收敛速度。

人工智能方法能够解决星座 QoS 路由中的 NP 问题,有效降低计算复杂度。算法的快速收敛性可以适应网络的高动态性,能够更好地满足用户业务 QoS 需求,有效提升 LEO 卫星网络的通信服务水平。

3 多层卫星星座路由算法

在 LEO 星座网络中,通常采用星间链路来实现星间通信,以提高传输效率,增强抗干扰能力。由于星座拓扑具有高

动态性,星上存储空间和计算能力受限,且星间链路时延较长,地面网络的路由算法无法很好地适应星座网络环境。同时,面对日益增长的业务需求,尤其是地面分布不均的突发数据业务(如物联网业务)的增加,易造成网络拥塞,此时需要通过流量均衡防止拥塞,以改善网络性能。

对于单层卫星星座网络^[26],目前已有大量关于支持拥塞控制和流量均衡的路由算法。例如,可以通过发送检测和确认数据包来感知链路状态^[27-28],并在正确的时间做出适当的路径调整决策或采用按需路由机制。这些拥塞控制和流量均衡方式在业务量较小时可以保障数据的传输,但是在大量业务的场景下依然会发生拥塞,从而导致网络性能的大幅度下降。为了满足多元化大业务量的数据传输需求,卫星星座网络需要更多的资源。

相比单层的卫星星座网络,多层卫星网络架构可以调动更多卫星网络资源,针对不同任务需求优化数据传输,提高网络传输性能;同时,由于路径数目的增加,网络的鲁棒性得到大大提高。

目前,针对多层卫星星座网络路由方法的研究主要包括双层卫星星座和三层卫星星座。双层卫星星座网络^[29]主要包括 MEO/LEO^[30-31]卫星网络和 GEO/LEO^[32-33]卫星网络。针对 MEO/LEO 卫星星座网络,已有的路由方案有卫星分组和组管理方法^[34],这是一种空间虚拟化的路由算法,其通过将 MEO/LEO 层间的链路均匀分配到每颗卫星^[35]来降低链路排队时延和层间链路的拥塞,通过增加路径数目来提高网络的连通性。针对不同的业务需求,Zhu 等^[36]提出了基于优先级和故障概率的双层卫星星座网络路由算法(Double-layer Satellite Communication Network Routing Algorithm Based on priority and failure probability, PFPR),其中 MEO 卫星网络分区域管理 LEO 卫星, MEO 卫星基于 LEO 层的路由需求采用遗传算法求解主、备链路,并将路由决策报文发送到 LEO 层卫星网络,由 LEO 层卫星实施路由查表和报文转发;同时 MEO 层卫星网络还可用于传输非实时数据。该算法有效降低了丢包率,提高了吞吐量,其实时传输业务速率得到了明显提高。然而, MEO/LEO 双层卫星星座网络的节点数目多、结构复杂、路由计算繁杂,且集中式路径计算容易引发网络扩展性问题。

GEO 卫星相对于地面静止,空间位置确定,结构更为简单,更易于进行拓扑计算,因此许多研究者对基于 GEO 卫星和 LEO 卫星的双层卫星星座网络进行了研究。双层卫星星座网络模型如图 2 所示。

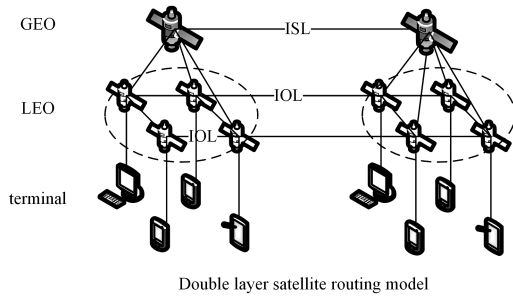


图2 双层卫星星座网络模型

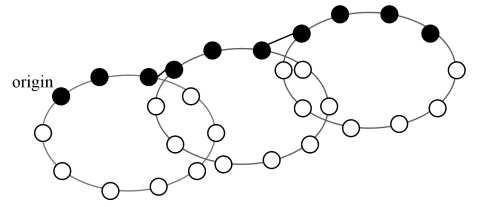
Fig. 2 Double-layer satellite constellation network model

Meng^[37]提出了面向拥塞控制与均衡的协同双层卫星网络路由算法,该算法采用了LEO卫星星座和GEO卫星路由相结合的路由模型。以路径跳数和排队时延为指标,当计算所得路由跳数小于7或时延小于100ms时,采用单层LEO卫星网络临时按序路由(Temporally-Ordered Routing Algorithm, TORA);当路由跳数超过7或时延大于100ms时,采用GEO/LEO双层卫星星座网络最短路径路由。该算法在大业务量时,时延和丢包率明显降低,但此算法没有考虑不同用户的业务需求。Ma等^[38]提出了针对不同业务的路由算法,将所需传输的数据包分为A、B、C三类。若GEO卫星到地面的传播时延较长,则适合传输非实时业务C类数据包;若LEO卫星到地面的传播时延短,则适合传输实时业务A、B类数据包。当LEO进行实时业务传输即将发生拥塞时,通过层间链路进行流量转移达到防拥塞的目的。该算法以LEO卫星网络为基础,首先根据传播时延进行一次路径选择,再根据网络的拥塞程度和业务时延需求进行具体的路径选择。当网络发生拥塞时,发送端发送信令通知卫星节点,使C类时延不敏感的数据包通过GEO卫星传输,时延敏感的B类数据包在LEO层星座内进行传输。该算法有效降低了端到端的平均时延和丢包率,在网络防拥塞方面取得了显著的效果。

三层卫星星座模型的结构相比双层卫星星座模型更为复杂,但其可利用的卫星资源更加充分,网络性能尤其在可靠性方面有更为突出的表现。Wang等^[39]提出了一种自适应路由算法ARA,该算法提出了基于SDN软件定义三层卫星网络模型:GEO卫星负责链路和资源调度,MEO卫星负责收集GEO地面目标和近目标LEO卫星的信息,LEO卫星作为底层的转发卫星,只负责接收GEO的命令和数据的转发。该算法不仅在路由性能方面有所提升,还可根据卫星运动的变化实时优化通信链路,使卫星网络具有更好的鲁棒性和灵活性。

随着立方星等低成本、短生产周期卫星的兴起,大密度卫星星座网络不断涌现。这类星座中的卫星更加小型化、处理能力更弱、能量供应更加受限,因此网络拓扑结构的动态变化更加频繁,要求路由算法效率和灵活性更高、开销更小。因此,Beatriz等^[40]提出了一种简单的分布式路由方法GomHop,由每颗卫星自己进行路由运算,不需要在地面站计算、维护和分发路由表。并且在路由计算过程中,考虑到轨道间ISL的高动态性和不可预测性,在路径选择时应尽早跳转到目标轨道,以尽量减少对轨间链路的使用,如图3所示。该算法具有简单、高效的特点,对星上处理能力的要求不高,性

能接近最短路径算法的最优解,计算复杂度大大降低,同时增加了路由的可靠性和灵活性。



GomHop Algorithm: GomHop next-hop calculation

图3 GomHop算法:下一跳选择

Fig. 3 GomHop algorithm: GomHop next-hop calculation

多层卫星星座网络通过从单一轨道面向多层轨道的纵向扩展,增加了可用空间节点的数量,大大增强了星座网络路由的灵活性,易于实现卫星星座网络的流量均衡和拥塞控制功能,便于实现集中管理和全局优化,有利于提高星座网络的传输性能。通过增加卫星数量的方式,小卫星星座同样增强了星座网络的路由灵活性,但它要求路由方法计算更简单、信令开销更小、计算复杂度更低。多层卫星星座网络路由算法如图4所示。

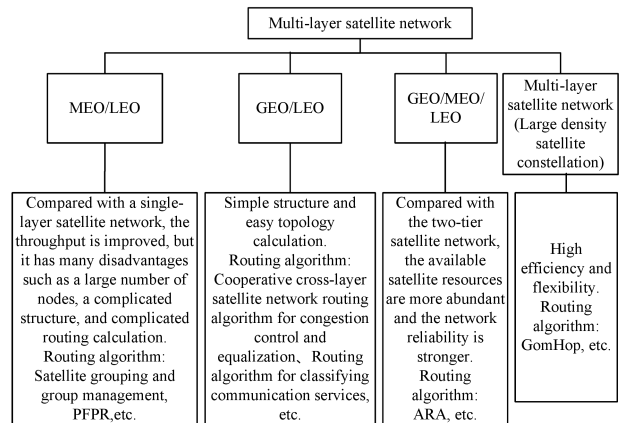


图4 多层卫星星座网络路由算法

Fig. 4 Multi-layer satellite network routing algorithm

4 卫星星座网络多径路由算法

传统的低轨卫星星座网络通常是数据包在单一路径上传输,但是这样的路由方式容易造成某一传输路径上的网络拥塞。多径路由技术指在数据传输过程中,同时沿多条路径传输数据包,如图5所示。相比传统的单一路径传输方式,多径路由方法在传输速率和流量均衡方面有极大的改善,能够显著提高网络的吞吐量。

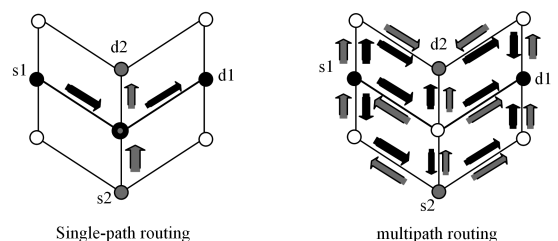


图5 单一路径路由和多径路由

Fig. 5 Single-path routing and multipath routing

Jiao 等^[41]提出了基于多径的低轨卫星星座网络路由策略,提前对网络进行流量分配。该算法定义了费用函数来计算每条链路费用值,并取前 M 条作为传输的路径,以最小化全网链路传输带宽方差与链路传输带宽开销总和为目标,得出每条路径分配的带宽比例,从而均衡全网流量。当网络任务数目增多时,与单路径相比,该算法能够大幅度地降低网络中的超负荷链路数,同时达到分流的效果,增加网络吞吐量。

基于多径的低轨卫星网络算法通过多径提高了传输效率和网络吞吐量,但还需要解决计算复杂度高的问题,否则对于传输要求高的卫星通信业务,如限制场景下 ADS-B 业务的传输,将难以适应,因此需要提出易于实现、计算复杂度低且效率高的多径路由算法。Wang 等^[42]提出了一种基于目的节点泛洪的全局局部路由算法(Double-layersatellite communication network routing algorithm based on priority and failure probability,DFGL)。DFGL 算法在全局范围内采用多目的节点的洪泛算法,在收敛节点的 N 跳范围内执行多径路由算法,并通过动态成本估计和概率路径选择进行进一步的改进。该算法在铱星系统场景下,针对 ADS-B 业务传输问题,采用局部多径全局洪泛的方式加快了算法的收敛速度,可以有效减少链路变化引起的丢包;通过优化多径的建立和选择过程,有效降低了 DFGL 的平均时延和丢包率。

虽然卫星网络多径路由算法相比单一路径算法能够进一步提高网络路由的性能,但多径路由方式也有其不足之处。例如,多个路径之间的分组传输所需要的协调会导致大量的带宽和时间开销,从而降低传输效率,因此基于网络编码(Networking Coding, NC)^[43]的多径路由方式应运而生。该方法将网络编码技术与路由相结合,对不同路径中传输的信息进行编码,再将编码后的信息以广播的方式进行转发,这需要网络中的通信节点具备编码与路由的双重功能。该技术在无线通信网络中应用广泛,经典的算法有 MORE^[44], CCACK^[45], ONCR^[46] 和 OMNC^[47] 等。这些路由算法都从不同的角度改进了传统的基于网络编码的多径路由算法,提升了网络性能^[48]。但对于 LEO 卫星网络,其星际链路上的传输时延比地面无线网络的链路时延长得多,停止等待和逐跳 ACK 机制会导致传输时延过长。因此,将这些路由算法应用于低轨卫星星座网络时还需要降低时延。Tang 等^[49]提出了基于网络编码的 LEO 卫星网络多径协作路由(Multipath cooperative routing with efficient acknowledgement for LEO satellite networks, NCMCR)协议,设计了无停止等待 ACK 机制来加速数据传输,源节点在接收之前发送批次的 ACK 消息之前可连续发送后续批次的 ACK。该协议不仅提高了传输速率,同时利用无停止等待 ACK 协议更好地适应了卫星网络场景。该算法极大地提升了卫星网络的带宽利用率,在增大吞吐量的同时降低了端到端时延。表 1 列出了基于多径路由的各种算法的优缺点。

多径路由算法利用空间复用的概念,显著增大了星座网络的吞吐量和链路利用率,对于卫星网络在均衡流量、控制拥塞方面有显著效用。基于 NC 的多径路由解决了多径路由存在的报文接收协调问题,进一步提升了卫星星座网络的传输效率。

表 1 算法比较

Table 1 Comparison of algorithms

Algorithm	Advantage	Disadvantage	
Multi-path cooperative routing of LEO satellite network	Low-orbit satellite network algorithm based on multipath	Improved transmission rate and traffic balance	The algorithm converges relatively slowly
	DFGL	Improve algorithm convergence speed	Significant bandwidth and time overhead
Multi-path cooperative routing of LEO satellite network based on network coding	MORE, ONCR and OMNC, etc.	Increased throughput	The ACK mechanism is inefficient and has a large transmission delay.
	NCMCR	Improved ACK response mechanism and improved routing efficiency	Large coding overhead

5 研究展望

以低轨卫星星座网络为背景的路由算法经过长期的研究和积累,已积累了大量研究成果。近年来,针对网络中不断出现的多业务、大容量的应用需求,结合星上载荷技术的发展,出现了更加热门的研究方向,尤其在基于人工智能的 QoS 星座路由算法、多层卫星星座路由算法和低轨星座多径路由算法等方面。

上述 3 个方面的星座路由算法分别为为多种业务提供 QoS、解决网络拥塞和流量不均问题、提高路由传输性能方面有显著提高,但是面对星上资源受限的现实条件,以及低轨卫星星座网络特有的高动态性,仍然有各自面临的问题。

基于人工智能的 QoS 算法由于采用智能算法,存在计算量大的问题。如果卫星节点依靠自身的计算和存储资源进行路由表计算,则难度较大。因此,通常由地面站完成路由表的计算和分发,但这容易造成对地面站较强的依赖性,反而限制了路由的灵活性。多层卫星星座网络路由算法由于在多层星座之间需要进行信息交互(如拓扑更新),因此会增加一部分信令开销;同时,星座管理复杂性更高。多径路由算法由于在传输数据的同时利用多条路径,虽然能够提高传输效率,但存在数据包失序的可能性,需要利用网络编码等方法解决失序问题。

为进一步完善网络路由性能,可以考虑将几种方法进行结合,如为满足路由算法的高灵活性和低复杂度需求,可以将基于人工智能的 QoS 算法与多层卫星网络结构相结合。需要注意的是,多层卫星星座网络结构对智能算法提出了更高的要求,多节点、多链路和高动态变化的特点导致智能算法的计算量大且更新路由表次数频繁;为更好地适应星座网络拓扑的动态变化,充分利用星上资源,要求智能算法有更好的分布式特性和更小的信令开销,以增加路由的灵活性和拥塞控制能力。

为大幅度提升网络流量均衡和拥塞控制性能,可以在运用多径路由算法的同时,考虑多层卫星星座网络结构。由于多层卫星星座结构的复杂性,多径路由的数据失序问题可能更加突出,信令开销也由于网络拓扑高动态引起的频繁路由更新而大幅度增加。

结束语 基于人工智能的 QoS 星座路由算法、多层卫星星座路由算法和多径路由算法对低轨卫星星座网络的路由性能都有不同层面的提升,分别在支持 QoS、流量均衡和防止拥塞、提高路由性能方面进行了优化,但是这些算法都在不同方面存在各自的局限。

随着空天地一体化、5G 等的全面部署,低轨星座路由技术的未来发展面临着多方面的抉择。未来我们将研究在不同的应用场景中,使用哪些 QoS 目标、采用什么样的卫星网络机构、采用何种路由算法来进行全局性评估。面对不同的应用背景,采用分布式还是集中式的算法框架、使用哪些 QoS 目标、采用多层还是单层星座结构等,这些选择需要进行全局性评估。

参 考 文 献

- [1] QI X G, MA J L, WU D, et al. A survey of routing techniques for satellite networks[J]. *Journal Communications and Information Networks*, 2016, 1(4): 66-85.
- [2] LEOPOLDR J, MILLER A. The Iridium communication system [J]. *IEEE Potentials*, 1993, 12(2): 6-9.
- [3] STURZA M A. Architecture of teledesic satellite system[C]// *The 4th Int'l Mobile Satellite Conf (IMSC'95)*. Britannia Community Services Centre, 1995: 212-218.
- [4] WERNER M. A dynamic routing concept for ATM-based satellite personal communication network [J]. *Selected Areas in Communications IEEE Journal*, 1997, 15(8): 1636-1648.
- [5] DIJKSTRA E W. A note on two problems in connexion with graphs [J]. *Numerische mathematik*, 1959, 1: 269-271.
- [6] CHANG H S, KIM B W, LEE C G, et al. Topological design and routing for low-earth orbit satellite networks[C]// *Proceedings of IEEE Globcome*. 1995: 529-535.
- [7] GOUNDER V V, PRAKASH R, ABU-AMARA H. Routing in LEO-based satellite networks [C]// *Wireless Communications and Systems*. 1999: 1-6.
- [8] WERNER M. A dynamic routing concept for atm-based satellite personal communication networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1997: 15, 1636-1648.
- [9] 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.
- [10] JIANG Z, LIU C, HE S, et al. A QoS routing strategy using fuzzy logic for NGEOSAT satellite IP networks[J]. *Wireless Networks*, 2018; 295-307.
- [11] MOHORICIC M, SVIGELJ A, KANDUS G. Traffic-dependent routing in ISL networks[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 2004, 40(4): 1160-1172.
- [12] NQUYEN H N, JUKAN A. Approach to QoS-based Routing for Low Earth Orbit Satellite Networks[C]// *IEEE Global Telecommunications Conference*. 2000: 1114-1118.
- [13] WANG H T. Research On Key Technologies for QoS Guarantees in Satellite Communication System[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [14] HU R, YANG C, HE J, et al. Clustering Scheme Based On Simulated Annealing Algorithm In Wireless Sensor Network[J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30(2): 1001-9081.
- [15] SONG Y, YAO X. Design of Routing Protocol and Node Structure in Wireless Sensor Network Based on Improved Ant Colony Optimization Algorithm[C]// *2017 International Conference on Computer Network & Electronic & Automation (ICCNEA)*. 2017: 236-240.
- [16] WEN G L. Research on Routing And Resource Management Technology For Space Optical Network [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [17] LIU Y A. Research on High-Dynamic Routing Technology of Air-based Communication Network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [18] WEN G, ZHANG Q, WANG H, et al. An ant colony algorithm based on cross-layer design for routing and wavelength assignment in optical satellitenetworks [J]. *China Communication*, 2017, 14(8): 63-75.
- [19] CHEN Y. Research and Design on QoS Routing Algorithm Based on Ant Colony Algorithm [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [20] LI R N. Research On Inter-Satellite Link Cross-Layer Routing Algorithm[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [21] XU H, WU S Q. A Distributed QoS Routing Based on Ant Algorithm for LEO Satellite Network[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2007(3): 361-367.
- [22] LIU H Y, SUN F C. Satellite network routing algorithm based on an orthogonal polynomialsneural network [J]. *Journal of Tsinghua University*, 2013, 53(4): 1000-0054.
- [23] GUO Q Z, GU R T, DONG T, et al. SDN-Based End-to-End Fragment-Aware Routing for Elastic Data Flows in LEO Satellite-Terrestrial Network[C]// *IEEE*. 2018: 2169-3536.
- [24] WEI D B, LIU J, PAN C S, et al. Computer Engineering; Ant colony optimization routing algorithm based on multi-QoS constraints in satellite networks[J/OL]. (2018-11-02). <http://doi.org/10.19678/j.issn>
- [25] ZHOU R, HE L W, TANG C C, et al. SDN Path Enhancement Algorithm Based on Multi-objective Constraint Genetic Algorithm [J]. *Computer Technology and Development*, 2019, 7: 17-22.
- [26] KUANG H F. Research on Routing Strategy for Large Scale Satellite Constellation with Low Earth Orbit[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [27] TAN H C, ZHU L D. A Novel Routing Algorithm Based on Virtual Topology Snapshot in LEO Satellite Networks[C]// *Proceeding of 2014 IEEE Computer Society*. 2014: 357-361.
- [28] CHEN Y J. A Design and Implementation of Routing Protocol in LEO Satellite Networks [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [29] AN K, LIN M, OUYANG J, et al. Secure transmission in cognitive satellite terrestrial networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(11): 3025-3037.
- [30] GUO Y J. The Research of Load Balanced Routing Protocol Based on Multilayer Satellite Network [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015.

- [31] ZHU Y, RUI L L, QIU X S, et al. Double-layer Satellite Communication Network Routing Algorithm Based on priority and failure probability[C]//2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). 2019: 1518-1523.
- [32] ZHANG S D, SUN L J, ZHOU J A, et al. Destruction-Resistant Routing Strategy For GEO/LEO Double-Layer Satellite Networks[J]. Journal of Nanjing University of Post and Telecommunications, 2018, 38(2): 1-7.
- [33] LIU G N. Reseach on Networking and Routing Technologies Bsed on QoS Performance of Multiple Satellites Communication Network [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [34] CHEN C O, EKICI E. A routing protocol for hierarchical LEO/MEO satellite IP network[J]. Wireless Network, 2005, 11(4): 507-521.
- [35] KAWAMOTO Y, NISHIYAMA H, KATO N, et al. A traffic distribution technique to minimize packet delivery delay in multilayered satellite networks[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2013, 62(7): 3315-3324.
- [36] ZHU Y, RUI L L, QIU X S, et al. Double-layer Satellite Communication Network Routing Algorithm Based on priority and failure probability[C]//2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Tangier, Morocco, 2019: 1518-1523.
- [37] MENG J. Congestion control and load balancing routing algorithm for multi-layered satellite networks[D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.
- [38] MA J L, QI X G, CHEN C Q. Routing Algorithm Based on Congestion Avoidance in Satellite Networks[J]. Journal of Jilin University, 2019, 57(2): 1671-5489.
- [39] WANG F, JIANG D D, QI S. An Adaptive Routing Algorithm for Integrated Information Networks[J]. China Communications, 2019, 16(7): 195-206.
- [40] SORET B, SMITH D. Autonomous Routing for LEO Satellite Constellations with Minimum Use of Inter-plane Links[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC). 2019: 1-6.
- [41] JIAO Y Y, TIAN F, SHI S, et al. Multipath routing based congestion control strategy for LEO satellite networks[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(18): 113-117.
- [42] WANG Y C, ZHANG X J, ZHANG T. A flooding-based routing algorithm for ads-b packets transmission in LEO satellite network[C]//2019 Integrated Communications Navigation & Surveillance Conference (ICNS). 2019: 1-9.
- [43] AHLWEDE R, CAI N, LI S Y R, et al. Network information flow[J]. IEEE Trans, Inf Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [44] CHACHULSKI S, JENNINGS M, KATTI S, et al. Trading Structure for Randomness in Wireless Opportunistic Routing [C]//Proc & ACM Conf & Appl & Technol & Archit & Protocols Comput. IEEE Commun, 2007: 169-180.
- [45] KOUTSONIKOLAS D, WANG C, HU Y C. CCACK: Efficient Network Coding based Opportunistic Routing Through Cumulative Coded Acknowledgments[C]//IEEE Infocom. 2010: 2919-2927.
- [46] XIANG Q, ZHANG H, WANG J, et al. On Optimal Diversity In Network-Coding-Based Routing In Wireless Networks [C] //IEEE Infocom. 2015: 765-773.
- [47] ZHANG X, LI B. Optimized multipath network coding in lossy wireless networks[C]//Int & Conf & Distrib & Comput & Syst. 2008: 243-250.
- [48] SUN W C, LIANG J, XIAO N, et al. Multipath Routing Protocol For Two-Layered Satellite Networks with Efficient Acknowledgement Mechanism[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(4): 1183-1187.
- [49] 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.



DONG Chao-ying, born in 1991, postgraduate. Her main research interests include satellite communications and so on.



LIU Ai-jun, born in 1970, Ph. D. His main research interests include satellite communication system theory, signal processing, space heterogeneous networks, channel coding and information theory.