

引用本文: 张家铭. 卫星激光通信网络研究进展[J]. 光通信技术, 2023, 47(5): 37-44.

卫星激光通信网络研究进展

张家铭

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

摘要: 为了弥补卫星网络中使用微波无线通信的不足, 卫星激光通信网络因具有高数据传输速率、体积小、重量轻、低功耗、小天线尺寸、抗干扰能力强等优点而备受关注。总结了国内外卫星激光通信网络研究进展, 介绍了卫星激光通信网络的关键技术、卫星网络结构、星间激光链路几何结构、卫星网络路由算法等重要内容, 最后展望了卫星激光通信网络的未来发展方向。

关键词: 卫星激光通信; 卫星组网; 星间激光链路

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)05-0037-08

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.05.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress of satellite laser communication network

ZHANG Jiaming

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to make up for the shortage of microwave wireless communication in satellite network, satellite laser communication network has attracted much attention because of its advantages such as high data transmission rate, small size, light weight, low power consumption, small antenna size and strong anti-interference ability. This paper summarizes the research progress of satellite laser communication networks at home and abroad, and introduces the key technologies of satellite laser communication networks, satellite network structure, geometry of inter-satellite laser link, satellite network routing algorithm and other important content. Finally, the future development direction of satellite laser communication network is prospected.

Key words: satellite laser communication, satellite networking, inter-satellite laser link

0 引言

传统的卫星通常使用 Ka 和 Ku 波段微波进行通信,这在一定程度上限制了卫星的通信容量。与微波通信技术相比,卫星激光通信具有不受频率限制、带宽大、传输速率高、保密性好等优势,而且其负载和通信终端都具有体积小、质量轻、功耗低、抗干扰能力强等特点^[1]。近年来,随着高空间、高光谱、高时域等多源遥感技术的广泛应用,业界对天基信息服务提出了更

高的要求,单颗卫星的中继方式已难以满足日益增长的业务需求,因此全球掀起了一股卫星组网热潮,许多国家纷纷开展卫星激光通信网络建设以争夺空间频谱和轨道等资源。本文将对卫星激光通信网络研究的进展情况进行介绍。

1 国外研究进展

1995 年,麻省理工学院信息与决策系统实验室对卫星激光网通信网络理论概念定义和传输层设计进行了研究,CHAN V W S 等人^[2]完成了大量与卫星激光网络相关的理论设计和定义工作,促进了卫星激光通信网络的发展。

2000 年,KARAFOLAS N 等人^[3]提出了应用于卫星星座中的光学波分复用网络,对星间激光链路的星座特性进行了分析,并介绍了所存在的问题。

2001 年,ORS T 等人^[4]对如何在卫星网络中利用多协议标签交换来提供因特网协议服务质量进行了

收稿日期:2023-05-29。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No.61377080)资助;陕西省重点产业创新项目(No.2017ZDCXL-GY-06-01)资助。

作者简介:张家铭(1999—),男,硕士研究生,本科毕业于北京信息科技大学通信工程专业,现就读于西安理工大学自动化与信息工程学院电子信息专业,主要从事无线光通信方面的研究工作。



张家铭: 卫星激光通信网络研究进展

研究,并介绍了所面临的问题和解决方案。

2001年,EKICI E等人^[6]提出了一种新的分布式路由算法,名为数据报路由算法。名为数据报路由算法。这种路由算法结合了虚拟节点和分布式策略,通过计算得到最短延迟路径,只需要知道目的卫星的位置就可以直接传输数据包。

2004年,DONNER A等人^[6]在多协议标签交换的基础上提出了一种卫星网络组网概念,并按照动态拓扑结构的特点对各种组网方案进行了探讨。

2007年,PAPAPETROU E等人^[7]提出了一种采用无限自组织网络的辅助定位分布式路由算法,该算法平衡了传输负载并且提高了数据传输的速率;同年,PAPAPETROU E等人^[8]提出了一种应用于卫星通信中的基于位置辅助的按需路由算法,仿真结果表明该算法能够降低端到端时延和时延抖动,提高系统的传输效率,同时还设计了一种基于卫星移动确定性机制,减少参与流量传输的卫星数量;KORCAK O等人^[9]提出了一种新的基于优先级的自适应最短路径路由算法,对链路的历史利用率和缓冲信息排序,以分布式的方式从多条最短链路中选择合适的下一跳链路,从而有效地解决了高纬度区域的网络拥堵问题。

2011年,FU X等人^[10]提出了一种用于多协议标签交换网络流量工程的路由算法,能够动态地建立具有带宽保证的星间激光链路,从而达到平衡网络负载的目的。

2012年,KAWAMOTO Y^[11]提出了一种通过对地面接收端的路由表进行重算来解决星际激光链路阻塞的方法,这种方法可以改善链路的使用效率,但也会带来较大的信令开销。

2013年,PAN C等人^[12]针对低地球轨道卫星星座网络中星间链路时间有限的问题提出了最小干扰算法。该算法将网络资源的利用率提高到了一个新的水平,使得网络能够接受更多的路由请求,改善了链路切换导致的通信时间长的问題。

2016年,FERNLS R等人^[13]阐述了在卫星激光通信中应用软件定义网络/网络功能虚拟化技术的优点及面临的挑战,并提出了3种解决方案;同年,为了应对低轨道卫星网络动态拓扑带来的挑战,HUANG J等人^[14]提出了一种基于虚拟拓扑的路由算法。该算法在时间上对卫星网络的动态拓扑进行离散处理。在每个快照中,卫星网络的拓扑结构保持不变。信关站可以先行于卫星计算出每个快照中的路由表,从而省略了卫星的实时计算部分。

2017年,GARDISIS G等人^[15]研究了如何将软件定义网络/网络功能虚拟化技术应用于卫星通信领域,分析了将卫星基础设施整合至软件定义网络中的优势和面临的挑战;同年,LYRAS N K等人^[16]综合考量了仰角、地面站的高度、云的空间变异性后,建立了一种单光学卫星链路和多空间分离光学卫星链路的无云视距概率预测的模型。

2018年,LYRAS N K等人^[17]对云层覆盖统计量的变化规律进行了分析,为选择光学地面终端提供了理论依据;同年,LIU J等人^[18]基于软件定义网络,在第五代移动通信(5G)地面网络与卫星网络的融合网络中,对控制器和网关的联合布局进行了研究,并给出了一种能够在满足时延限制条件下实现近似最优时延和最高网络可靠性的解决方案。

2019年,WANG F等人^[19]提出了自适应路由算法,该算法适用三层卫星架构,能够根据卫星拓扑的动态变化来优化信息链路,从而提高卫星网络的动态性和灵活性;同年,YANG K等人^[20]结合星地综合网络,提出并深入分析了一种基于软件定义网络的K-means网络划分算法,这种算法能够提高网络的可靠性和降低传输延迟;LYRAS N K等人^[21]为在中地球轨道(MEO)上工作的光波段卫星网络提供了2种优化算法,这些算法保证了星间链路在云阻塞情况下的有效性,并最小化了光学地面站的网络规模;LIU W等人^[22]针对全球各地区用户分布不均匀所导致的低轨道卫星网络的负载不均衡问题,提出了一种基于分段路由的流量返回路由算法。该算法根据网关与反向缝之间的相对位置关系,动态划分递归网络中的重负载区和轻负载区。针对不同区域的特殊情况,选择最优的路由策略。

2020年,LIU J等人^[23]提出一种以选择性迭代Dijkstra算法和选择性拆分负载均衡为基础的策略,充分地利用了地球轨道(LEO)卫星网络中的星间激光链路,解决低LEO网络流量分配不均而引起的链接拥塞问题,可以合理地分流拥塞节点的流量,降低其它区域网络的负荷。

2021年,POLNIK M等人^[24]基于云量的预测,提出了2类不确定模型:一类是多面体不确定集合的鲁棒性优化,另一类是基于矩阵的模糊集合的鲁棒性优化,分析并计算了不同模型的性能。

2 国内研究进展

2004年,CHAN S等人^[25]对天基骨干网络的星座

拓扑结构进行了研究,提出了一种用于在轨道上对天基资源进行处理快速空对空通信方案。

2006年,李勇军等人^[26]在波分复用技术的基础上提出了实现星间激光链路通信组网,通过分析卫星激光通信系统的拓扑结构,并结合光码分多址接入,建立了基于波分复用/光码分多址的卫星网络。

2007年,易先清等人^[27]提出了适用于地球同步轨道(GEO)/MEO双层卫星网络架构的路由算法,通过分簇管理、簇备份等方式将MEO层的数据信息上传至GEO卫星,并通过GEO卫星间相互传输MEO卫星信息,从而达到高层卫星对低层卫星的管理。

2008年,邹琦等人^[28]针对LEO星座提出了一种以离线计算为基础的路由算法,在保证路由效率的前提下,通过使用备份路径来提供流量自适应机制,算法所需的星上存储开销和处理开销较小,具有较好的端到端时延性能。

2009年,YANG Q L等人^[29]研究了波分复用架构的卫星激光网络,发现网络串扰对网络的性能有很大影响,而提高激光带宽可以有效地降低网络串扰;同年,李勇军等人^[30]利用覆盖带法,提出了一种全球连续覆盖LEO/MEO双层卫星光网络结构,该结构中的轨道卫星在全球范围内和国内的覆盖率分别达到了99.9%、100%。

2010年,TAN L等人^[31]在分析了非地球同步卫星网络中激光传输的波长需求后,发现了影响波长需求的因素,即波长需求与活动终端的所占比例、最大允许的星间链路跳数以及每颗卫星的星间链路终端有关;同年,TANG Q L等人^[32]对采用波长路由的卫星激光网络进行了研究,提出了一种能够标注波长需求的算法,并基于该算法估计波长需求的边界;LI Y J等人^[33]提出了一套以零相位因子为基础且覆盖全球的LEO/MEO双层卫星激光网络。该网络可以为中国单卫星系统和双卫星系统分别提供最小俯仰角(21° 、 16°)。零相位因子的LEO星座在方位角和俯仰角方面的性能参数均有很大优势,因此在低通信量情况下,长波波段和短波波段之间的差异很小,非常适合用于星间激光链路。

2014年,高丽娟等人^[34]提出了一种改变路由表计算方式的路由算法,该算法只适用于卫星数量较少、拓扑结构较简单的卫星网络;同年,杨力等人^[35]提出了一种基于链路长度的带宽估计传输控制协议算法,通过优化拥塞窗口、慢启动阈值及超时重传定时器中相关参数,使拥塞控制算法在传输延迟突然变化的情况

下保证了较高的吞吐量,适用于卫星网络的动态环境。此外,相对于传输控制协议算法,该协议算法在卫星网络中的吞吐量提升了2.8%,有效地解决了由于时延突变导致的拥塞控制机制中的问题,包括超时重传时间估计不准确和对拥塞窗口计算产生的不良影响。

2015年,DONG Y等人^[36]为了解决卫星激光网络的路由和波长分配的问题,研究了一种以小窗口策略为基础的蚁群算法,可以将阻塞概率降低50%(与Dijkstra算法相比),并且提高了资源利用率;同年,陈二虎等人^[37]设计了一种2+2的卫星组网网络架构,与地面程控交换技术的分析方法相结合,对光网络的性能指标进行了定义,在满足一定的接入丢失概率和资源利用率的前提下,该卫星网络可以支持50颗用户卫星的随机接入;陈健飞^[38]根据卫星位置的可预测性,提出了一种双层卫星网络路由算法,解决了当卫星进入较高纬度区域时,星间链路被切断导致数据丢失的问题,从而在提高系统可靠性的同时大大降低了激光网络的数据丢包率。

2017年,ZHENG Y X等人^[39-40]研究了异构卫星激光网络的拓扑结构,解决了松弛解的初始化和重构问题,并针对卫星激光网络的分布式设计了一种分布式最小生成树算法,以提高网络的整体性能并降低系统的计算复杂度;同年,WEN G L等人^[41]为了消除卫星激光网络中多普勒波长偏移所造成的负面影响,提出了蚁群路由和波长分配算法,该算法具有较高的通信成功概率且具备优秀的全局搜索能力;徐双等人^[42]根据卫星通信系统的特点,设计了一套适用于卫星通信系统的容量模型,并将其引入到卫星通信系统的容量分析中,该网络容量分析方法具有较高的计算效率和较低的时间开销。

2018年,李婷婷^[43]研究了一种适用于GEO/LEO双层卫星网络的光突发交换结构,重点设计了基于光突发交换的天基骨干网的资源调度机制,以提供高速数据传输速率和交换容量;同年,张佳乐等人^[44]在传统卫星网络切换机制的基础上,提出了一种解决软件定义网络中波束频繁切换问题的多波束切换机制,通过定量分析切换过程中所涉及到的多个指标,以实现高精度、细粒度的波束切换。

2019年,LIU Y Q等人^[44]提出了蜂群优化算法,该算法有效降低了激光链路的成本,同时全面考虑了波长资源的利用率和通信跳数,实现了波长的高效利用,减少了不必要的过度绕行,从而保障了系统的误码率性能;同年,LIU X F等人^[45]建立了卫星激光网络

张家铭: 卫星激光通信网络研究进展

模型,提出了一种基于子树合并和最大代数连通性算法,该算法在保证卫星激光网络拓扑结构具有更高平均边缘权值的前提下,有效地提升了卫星激光网络的代数连通性。

2020年,LIU X F等人^[47]针对间歇性星间链路中的波长复用问题,提出了一种动态激光网络波长的估计方法,并进一步分析了拓扑变化对波长需求的影响(波长需求取决于网络连通性和所需的可达时间),发现网络连通性越高,网络的可达性就越好;同年,PENG C等人^[48]提出了一种分离流量疏导算法,该算法可以在最大限度减少波段数目的情况下尽可能地满足业务流量需求,适用于大型网络中的静态流量疏导设计,为无线网络的流量疏导设计提供了一种有效的思路;SUN X等人^[49]提出了超级卫星节点计算存储函数算法,有效地降低了对波长的要求,提高了网络连通性,降低了星上激光器、调制器以及建立星间链路的成本,对卫星激光网络的建立具有重要的参考价值。

2021年,张路^[50]提出了2种卫星通信网络路由算法,围绕LEO卫星网络和LEO/MEO卫星网络场景,解决了网络节点故障和网络拥塞问题;同年,王瑞松等人^[51]提出了一种利用网络编码提高卫星网络容量的方法。该方法分为2种情况:网络编码情况和非网络编码情况。其中,网络编码对网络容量的提升幅度大大超过了非网络编码方案,而且随着资源和网络规模的增大,网络容量的提升幅度也逐步增大。

2022年,刘越等人^[52]提出了一种信标步进跟踪算法,当载体的位置和姿态变化较小时,该算法更接近于程序的跟踪性能,而且还能减小用户终端接入卫星通信网络时的服务中断概率;同年,左珮良等人^[53]提出了一种面向动态低地球轨道卫星的路径选择方法,该方法利用深度学习建立的路径选择模型,根据周边节点的空间位置、间距以及可用带宽等信息,自动选择路径,与典型的分布式路由算法相比,该算法具有更好的时延特性、收敛性以及泛化能力;郑健阳等人^[54]针对星地网络提出了一种有效的负载均衡算法,用以减少地面网络链路中由于负载造成的问题,有效地降低了网络链路拥塞。

2023年,刘宇婷等人^[55]提出了一种星形交叉循环建链策略,用以解决极轨道星座的反向缝建链问题。与以往的建链策略相比,该策略可使极轨道星座的数据传输延迟降低30%~60%,从而明显提升了LEO卫星网络的传输性能。同年,谢人超等人^[56]提出了一种基于激励函数和处理时延的量子进化算法,用以解决

LEO卫星场景下的深度神经网络分布式推理问题。该算法提高了LEO卫星场景下的智能服务效率。

3 卫星激光通信网络

3.1 关键技术

3.1.1 软件定义卫星网络

卫星激光通信网络具有高动态、时空跨度大等特点,但是,由于不同卫星负载不同,在轨硬件更新、维护成本较高。软件定义网络可以使卫星激光通信网络的部署更加灵活,并降低其网络复杂程度和成本。通过将数据平面和控制平面分开,控制平面统一管理网络,数据平面只进行数据传输,并使用虚拟化资源切片、动态路由管控等技术,可以根据不同的应用场景制定不同的用户服务。

3.1.2 通信卫星星座设计

通信链路的持续时间、通信延时以及星间链路的干扰、覆盖、容量需求等问题是设计卫星星座时必须考虑的重要方面。以往的卫星通信系统使用单层卫星星座传输语音、数据等业务,然而单层卫星星座难以满足用户日益增长的大容量、高质量和高可靠性的业务需求,因此必须进行更加合理和优化的星座设计。多层卫星星座可以提高卫星激光通信网络的可靠性和抗毁性,并为网络提供更多的链路选择^[57]。

3.1.3 光机电设计技术

为了降低激光在自由空间中传输的功率损耗,增加发射端光学系统的增益,要求传输光束以近衍射极限角发射。这对光纤耦合、光束整形、望远镜面型等提出了更高的设计要求,只有找到合适的光纤与光学系统匹配方式(包括不同芯径和不同束散角),才能满足近衍射极限角发射、发射端激光整形准直以及高效率光纤耦合的需求。在光学基础平台技术方面,光学系统设计需要注重模块化和轻量化,以满足未来空间卫星激光通信网络一对多同步传输的需求。

3.1.4 空天异构网络资源管理

卫星激光通信网络中的异构网络资源管理主要采用多址接入、切换和传输这3种技术,对频谱、发射功率、波束和缓存资源进行高效管理,以合理地分配和使用网络资源,并达到提高系统资源利用率的目的。多址接入技术能够精细地切割资源粒度,从而降低终端之间的碰撞概率;切换技术负责保证终端通信的连续性,并控制同层接入点和异层接入点的合理切换;传输技术则通过降低信道的衰落和提高链路的抗干扰能力,增强了链路的自适应能力。

3.2 卫星网络架构

应用较为广泛的卫星网络架构包括单层卫星网络和多层卫星网络。目前,对单层卫星网络的研究较为成熟。然而,随着卫星激光通信网络技术的飞速发展,单层卫星网络难以满足不断提高的服务需求,因此,多层卫星网络逐渐成为当前卫星激光通信网络的重要研究方向。

3.2.1 单层卫星网络

单层卫星网络是由处于同一轨道的卫星组成的网络,主要有 LEO 网络、MEO 网络和 GEO 网络。

LEO 卫星网络一般由上百颗卫星组成,因为轨道低,星地链路具有较好的性能和较低的传输时延。但是,LEO 卫星网络的搭建时间周期较长,卫星网络控制系统复杂,导致成本高昂,同时,卫星网络以及波束的切换频繁,且切换时间间隔也较短。除此之外,由于信关站数量较多,LEO 卫星网络对捕获跟踪对准(ATP)系统的要求较高,并且必须考虑多普勒效应所产生的影响。

MEO 卫星网络通常由十几颗卫星组成,与 LEO 卫星相比,其传输时延更高。考虑到星间链路距离、上下行链路等多种因素,作为整个系统,MEO 卫星网络的时延性能要求远超 LEO 卫星网络,并且具有更低的切换概率、多普勒效应减小,使空间控制系统和 ATP 系统更为简化^[58]。

GEO 卫星网络的优点在于,即使卫星数量较少,仍能保证高全球覆盖率,切换概率低,ATP 系统简单。相比 MEO、LEO 卫星网络,GEO 卫星网络的激光链路传输距离最远,但链路损失和传输时延较大,因此仅能满足低轨高功率服务的需要,在高、中纬度区域的覆盖效果并不理想。

3.2.2 多层卫星网络

单层卫星网络由于自身的局限性,已经难以满足在业务量、传输质量和全球覆盖率等方面的需求。多层卫星网络则充分利用了各层卫星网络的优点,在频谱利用率、覆盖仰角和重复次数等多方面有着比单层卫星网络更好的表现^[60]。主要的多层卫星网络有以下 2 种:

1) 双层卫星网络通常以 LEO-MEO 双层卫星网络形式存在。MEO 卫星间主要通过层内星间链路进行连接,并且与可视范围内的 LEO 卫星通过轨内星间链路进行连接。同样,LEO 卫星间也通过星间链路相互连接。LEO 层卫星主要负责与小型移动终端进行通信,以减小链路损失。MEO 层卫星则作为中继,同时为地

面站与大型终端之间提供通信服务^[61]。

2) 三层卫星网络同时兼顾了 LEO 和 GEO 这 2 个网络层的优点,并弥补了它们的不足。母卫星对整个卫星网络进行管理,子卫星则处理业务需求。这降低了信号的衰减和时延,并解决了卫星之间切换频繁的问题。然而,由于三层卫星激光网络系统规模庞大、结构复杂且含有众多卫星节点,因此大大增加了系统路由表的计算量和计算复杂程度。此外,为了实时反映三层卫星网络的路由状况,需要频繁地更新路由表。路由表的反复计算会产生新的链路时延。新时延的积累给卫星网络带来了额外的负载,增加了通信开销,甚至可能导致链路阻塞。

卫星网络的拓扑结构见文献[63],本文不再赘述。

3.3 星间激光链路几何结构

为了提供覆盖全球的通信服务,卫星激光网络需要在卫星之间建立星间链路,并通过星间链路和路由协议实现全球互联。星间链路主要分为轨内链路、轨间链路、层间链路 3 种。一般通过微波或激光传输技术,构建起星间链路,进而形成卫星通信网络。多个卫星节点之间的连接通过这些链路实现,并形成了卫星通信网络。如果在轨卫星数量和星间链路数量都相同,就可以通过轨道间链路和轨道内链路构成一个具有规则网状结构的卫星通信网络。同一轨道的卫星通过轨内链路连接。当临近高纬度时,邻近卫星间的邻接关系发生变化,星上装置需要 180° 转向,追踪邻近卫星,维持轨间链路的通信。也可以在邻近节点发生变化时,切断原有链路,重建链路的连接。星间激光链路中每个卫星包括 3 种几何形态^[62]: 1) 具有 4 个星间链路的“W”型几何形态, 2) 具有 4 个星间链路的“倾斜”几何形态, 3) 具有 3 个星间链路的一般形态。

3.4 卫星网络路由算法

卫星通信网络与地面通信网络的主要区别在于其复杂的拓扑结构和动态变化。静态路由算法不适用于卫星通信网络。为了高效地处理卫星网络拓扑的动态变化,需要使用能够维护和更新路由表的动态路由算法。根据路由决策主体的不同,卫星路由算法可以分为集中式、分布式和混合式 3 种。

3.4.1 集中式卫星路由算法

集中式卫星路由算法是由中心节点负责路由表的计算和维护,并将结果分发到各个卫星节点。卫星节点根据路由表选择最佳的下一跳节点并传输数据。中心节点会收集网络拓扑机构动态变化中的星间链路信息,以完成对路由表的更新和计算^[64]。

表 1 各种卫星路由算法优缺点

卫星路由算法	优点	缺点
集中式	流量分配和负载均衡效果较好	运算复杂度较高、信令开销大、难以实时监测链路和节点状态变化
分布式	卫星节点运算负担小、更好地监测网络流量变化	路由决策路径能力较差,导致增加不必要的信令开销
混合法式	流量分配和负载均衡效果好、卫星节点运算负担小	算法复杂度较高,对星间链路和星上处理能力要求较高

集中式卫星路由算法从全局角度出发,能够充分考虑卫星网络整体的网络状态和路由表的计算,从而实现较好的流量分配和负载均衡。然而,由于单颗卫星的星上处理与运算能力有限,集中式卫星路由算法存在运算复杂度高、信令开销大等问题。即使采用具有较强计算能力的地面站作为中心节点,当卫星节点、链路出现异常或故障时,也难以实时监测链路和节点的状态变化并更新路由表,这会对网络性能产生不可预估的影响。

3.4.2 分布式卫星路由算法

分布式卫星路由算法与集中式卫星路由算法的主要区别在于,每个卫星节点都可以作为路由决策的主体,独立计算出最佳的下一跳节点并发送数据。这简化了路由表的计算过程,使其不再依赖于中心节点^[64]。

分布式卫星路由算法考虑到单卫星处理和计算能力有限的问题,通过将计算量分散到多个卫星,降低了卫星节点的计算负担,方便更有效地监测网络流量的变化并实现路由表的动态更新。然而,这种分布式卫星路由算法的一个缺点是,每个卫星节点独立选择下一跳节点,这可能导致从整体上看路由决策不是最优的,因此,数据可能会被转发到非最优路径中,增加了不必要的信令开销。

3.4.3 混合式卫星路由算法

混合路由算法结合了集中式路由和分布式路由的优点。一部分卫星节点具备独立计算出下一跳的最佳节点并发送数据的能力,这些节点采用分布式卫星路由算法。其余的卫星节点则采用集中式卫星路由算法,这些节点将计算出的路由表分发给其它节点。

各种卫星路由算法优缺点如表 1 所示。

4 结束语

星激光通信作为一种新型的通信方式,其最大的特点是抗干扰能力强、传输速率高、通信容量大。目前,国内外对卫星激光通信网络的研究主要集中在卫星组网和星间传输等方面。随着对卫星激光通信网络研究的不断深入,其技术将越来越成熟,应用前景也将越来越广阔,未来进一步的发展方向可能体现在以

下几方面:

1)减少网络拓扑动态变化对网络性能的影响。卫星激光网络中的拓扑变化严重影响了网络性能,导致星间激光链路频繁中断。因此,卫星激光网络需要引入动态灵活的解决方案,以最大限度地降低由于卫星激光网络拓扑结构的动态变化所产生的影响。

2)合理使用卫星激光通信网络资源。卫星激光通信网络中链路资源和硬件资源十分稀缺,如何提高网络链路资源利用率并减少星上硬件资源消耗是目前亟待解决的问题。

3)多业务承载。卫星激光通信网络的宗旨是向全球范围内的用户提供广泛覆盖、无缝衔接、全方位、多样化、高质量和高效率的通信服务。因此,需要采用合适的技术来承载多种业务在卫星激光通信网络中的传输。

参考文献:

- [1] 姜会林,付强,赵义武,等. 空间信息网络与激光通信发展现状及趋势[J]. 物联网学报, 2019, 3(2): 1-8.
- [2] CHAN V W S. Optical satellite networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(11): 2811-2827.
- [3] KARAFOLAS N, BARONI S. Optical satellite networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(12): 1792-1792.
- [4] ORS T, ROSENBERG C. Providing IP QoS over GEO satellite systems using MPLS [J]. International Journal of Satellite Communications, 2001, 19(5): 443-461.
- [5] EKICI E, LILDIZ I F, BENDER M D. Datagram service distributed routing algorithm strategy in LEO satellite communication network [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(2): 137-147.
- [6] DONNER A, BERIOLI M, WERNER M. MPLS-based satellite constellation networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(3): 438-448.
- [7] PAPETROU E, KARAPANTAZIS S, PAVLIDOU F N, et al. Multiservice on-demand routing in LEO satellite networks [J]. IEEE Transactions On Wireless Communications, 2007, 8(1): 107-112.
- [8] PAPAPETROU E, KARAPANTAZIS S, PAVLIDOU F N. Distributed on-demand routing for LEO satellite systems[J]. Computer Networks, 2007, 51(15): 4356-4376.
- [9] KORCAK O, ALAGOEZ F, JAMALIPOUR A. Priority-based adaptive routing in NGEOSatellite networks[J]. International Journal of Communication Systems, 2007, 20(3): 313-333.

张家铭: 卫星激光通信网络研究进展

- [10] FU X, SUN L J, YE X G, et al. Routing algorithm for MPLS traffic engineering in satellite network [J]. Journal on Communications, 2011, 32(5): 104–104.
- [11] KAWAMOTO Y, NISHIYAMA H, KATO N, et al. A traffic distribution technique to minimize packet delivery delay in multilayered satellite networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(7): 3315–3324.
- [12] PAN C, DU H, LIU Q. A routing algorithm for mpls traffic engineering in LEO satellite constellation network[J]. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 2013, 9(10): 4139–4149.
- [13] FERRUS R, KOUMARAS H, SALLENTO O G, et al. SDN/NFV-enabled satellite communications networks: opportunities, scenarios and challenges[J]. Physical Communication, 2016, 18(2): 95–112.
- [14] HUANG J, SU Y, HUANG L, et al. An optimized snapshot division strategy for satellite network in GNSS [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(12): 2406–2409.
- [15] GARDIKIS G, HARILAOS K, SAKKAS C, et al. Towards SDN/NFV-enabled satellite networks [J]. Telecommunication Systems, 2017, 66(4): 615–620.
- [16] LYRAS N K, KOUROGIORGAS C, PANAGOPOULOS A. Cloud free line of sight prediction modeling for optical satellite communication networks[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(7): 1537–1540.
- [17] LYRAS N K, EFREM C N, KOUROGIORGAS C I, et al. Optimum monthly based selection of ground stations for optical satellite networks[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(6): 1192–1195.
- [18] LIU J, SHI Y, CAO Y, et al. Joint placement of controllers and gateways in SDN-enabled 5G-satellite integrated network [J]. Telecommunications Weekly, 2019, 36(2): 221–232.
- [19] WANG F, JIANG D, QI S. An adaptive routing algorithm for integrated information networks [J]. China Communications, 2019, 12(2): 108–132.
- [20] YANG K Z, ZHANG B N, GUO D X. Partition-based joint placement of gateway and controller in SDN-enabled integrated satellite-terrestrial networks[J]. Sensors, 2019, 19(12): 2774–2775.
- [21] LYRAS N K, EFREM C, KOUROGIORGAS C, et al. Daniel optimizing the ground network of optical MEO satellite communication systems[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 14(3): 3968–3976.
- [22] 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(1): 112044–112053.
- [23] LIU J, LUO R, HUANG T, et al. A load balancing routing strategy for LEO satellite network [J]. IEEE Access, 2020, 8(1): 155136–155144.
- [24] POLNIK M, ARULSELVAN A, RICCARDI A. Scheduling space-to-ground optical communication under cloud cover uncertainty [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(5): 2838–2849.
- [25] CHAN S, CHAN V W S. Constellation topologies for a space-based information network backbone using optical intersatellite links [J]. IEEE Access, 2004, 2(1): 812–821.
- [26] 李勇军, 赵尚弘, 张冬梅, 等. 空间编队卫星平台激光通信链路组网技术[J]. 光通信技术, 2006, 30(10): 47–49.
- [27] 易先清, 冯明月, 赵阳, 等. 一种基于 GEO/MEO 星层组网的卫星网络抗毁路由研究[J]. 计算机科学, 2007(8): 74–82.
- [28] 邹琪, 白跃彬, 吴渭, 等. 一种高效的 LEO 卫星星座路由算法[J]. 高技术通讯, 2008, 18(8): 795–800.
- [29] YANG Q L, TAN L Y, MA J. Analysis of crosstalk in optical satellite networks with wavelength division multiplexing architectures[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(6): 931–938.
- [30] 李勇军, 赵尚弘, 吴继礼, 等. 全球覆盖稳定拓扑 LEO/MEO 双层卫星激光网络设计[J]. 光电子·激光, 2009, 20(3): 324–328.
- [31] TAN L, YANG Q, MA J, et al. Wavelength dimensioning of optical transport networks over nongeosynchronous satellite constellations [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2010, 2(4): 166–174.
- [32] YANG Q L, TAN L Y, MA J, et al. An analytic method of dimensioning required wavelengths for optical WDM satellite networks[J]. IEEE Communications Letters: A Publication of the IEEE Communications Society, 2011, 15(2): 247–249.
- [33] LI Y J, WU J L, ZHAO S H, et al. A novel two-layered optical satellite network of LEO/MEO with zero phase factor[J]. Science China Information Sciences, 2010, 53(6): 1261–1276.
- [34] 高丽娟, 蒋太杰. 卫星网络连接度与高效路由算法分析与改进[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(10): 2071–2075.
- [35] 杨力, 李静森, 魏德宾, 等. 一种高动态卫星网络的拥塞控制算法[J]. 宇航学报, 2014, 35(8): 953–960.
- [36] DONG Y, ZHAO S H, RAN H D, et al. Routing and wavelength assignment in a satellite optical network based on ant colony optimization with the small window strategy[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7(10): 995–1000.
- [37] 陈二虎, 刘颖, 刘璐, 等. 激光链路中继卫星系统网络设计及性能分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2778–2782.
- [38] 陈健飞. 多层卫星网络路由策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [39] ZHENG Y X, ZHAO S H, LIU Y, et al. Weighted algebraic connectivity maximization for optical satellite networks[J]. IEEE Access, 2017, 5(1): 6885–6893.
- [40] ZHENG Y X, ZHAO S H, LIU Y, et al. Topology control in self-organized optical satellite networks based on minimum weight spanning tree[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 69(10): 449–457.
- [41] WEN G L, ZHANG Q, WANG H T, et al. An ant colony algorithm based on cross-layer design for routing and wavelength assignment in optical satellite networks[J]. China Communications, 2017, 14(8): 63–75.
- [42] 徐双, 王兴伟, 黄敏, 等. 一种卫星网络容量智能分析方法[J]. 计算机学报, 2017, 40(7): 1572–1582.
- [43] 李婷婷. 基于光突发交换的天基骨干网资源调度机制研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [44] LIU Y Q, ZHANG Q, XIN X J, et al. Bee colony algorithm optimization based on link cost for routing and wavelength assignment in satellite optical networks[J]. IEICE Transactions on Communications, 2019, 28(6): 690–702.
- [45] LIU X F, CHEN X Q, YANG L, et al. Dynamic topology control in optical satellite networks based on algebraic connectivity[J]. Acta Astronautica, 2019, 165(12): 287–297.
- [46] 张佳乐, 钱红燕, 成翔, 等. 一种软件定义卫星网络的多波束切换机

张家铭: 卫星激光通信网络研究进展

- 制[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(12): 2503–2509.
- [47] LIU X F, YANG L, CHEN Q, et al. An analytic method of wavelength requirements in dynamic optical satellite networks [J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(11): 2569–2573.
- [48] PENG C, ZHAO S H, LI R X, et al. Separated traffic grooming for low earth orbit (LEO) optical satellite networks with wavelength dimensioning [J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2020, 38(6): 499–511.
- [49] SUN X, CAO S Z. A routing and wavelength assignment algorithm based on two types of LEO constellations in optical satellite networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(8): 2106–2113.
- [50] 张路. 中低轨卫星通信网络路由算法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [51] 王瑞松, 钟志聪, 刘功亮, 等. 基于网络编码的卫星网络容量提升方法[J]. 移动通信, 2021, 45(5): 2–7.
- [52] 刘越, 黄印, 何江涛, 等. 面向多波束卫星通信网络的步进跟踪方法[J]. 电讯技术, 2022, 62(12): 1734–1740.
- [53] 左珮良, 王晨, 蒋华. 一种基于强化学习的低轨卫星网络智能路由算法[J]. 北京电子科技学院学报, 2022, 30(2): 35–43.
- [54] 郑健阳, 李晖, 周又玲, 等. 一种适用于星地网络的流量负载均衡算法[J]. 电讯技术, 2022, 62(8): 1085–1092.
- [55] 刘宇婷, 田丰, 李国通. 一种高效的低轨卫星网络反向缝建链策略[J]. 中国科学院大学学报, 2023, 40(2): 240–249.
- [56] 谢人超, 杨煜天, 唐琴琴, 等. 低轨卫星网络星载边缘 DNN 推理策略[J]. 北京邮电大学学报, 2023, 46(2): 57–63.
- [57] 崔高峰, 李鹏绪, 张尚宏, 等. 天地一体化信息网络中卫星通信关键技术初探[J]. 电信网技术, 2017(10): 1–6.
- [58] FRANCK L, MARAL G. Static and adaptive routing in ISL networks from a constellation perspective [J]. International Journal of Satellite Communications, 2002, 20(6): 455–475.
- [59] 蒋瑞红, 冯一哲, 孙耀华, 等. 面向低轨卫星网络的组网关键技术综述[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 37–47.
- [60] 陈伟琦. 多层卫星网络卫星链路优化与分析技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [61] 韩慧鹏. 低轨通信星座星间链路浅析[J]. 卫星与网络, 2018, 19(8): 40–42.
- [62] 陈春绮. 多层卫星网络建模与故障诊断技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [63] 王振永. 多层卫星网络结构设计与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [64] 倪少杰, 岳洋, 左勇, 等. 卫星网络路由技术现状及展望[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(2): 383–395.