

基于SDN的卫星通信网络：现状、机遇与挑战

杨 丹¹, 刘 江^{1,2}, 张 然¹, 刘方琪¹, 欧阳曼¹, 黄 韬^{1,2}, 刘韵洁^{1,2}

(1.北京邮电大学网络与交换国家重点实验室, 北京 100876 ;

2.紫金山实验室未来网络研究中心, 江苏 南京 211111)

摘 要：调研当前基于SDN的卫星通信网络研究情况，探讨基于SDN的卫星通信网络架构及相关关键技术方案；对基于SDN的卫星通信网络面临的机遇和挑战进行深入分析。

关键词：SDN；卫星通信网络；卫星通信网络架构；卫星路由；卫星移动性管理

中图分类号：TN929

文献标识码：A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.20200205

SDN-Based Satellite Networks: Progress, Opportunities and Challenges

YANG Dan¹, LIU Jiang^{1,2}, ZHANG Ran¹, LIU Fangqi¹, OUYANG Man¹, HUANG Tao^{1,2}, LIU Yunjie^{1,2}

1.State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2.Purple Mountain Laboratory Future Network Research Center, Nanjing 211111, China

Abstract: The current research status of SDN-based satellite communication networks was investigated, the SDN-based satellite communication network architecture and related key technical solutions was introduced and discussed; The opportunities and challenges faced by SDN-based satellite networks were discussed.

Keywords: software-defined networking, satellite networks, satellite network architecture, satellite routing, satellite mobility management

1 引言

自互联网诞生以来，互联网的规模不断扩大，业务类型不断增加，人类的生产生活随着互联网的发展得到了翻天覆地的变化。然而，传统的移动通信网络与固定网络的覆盖范围有限，仍有大面积的陆地和海洋无法得到覆盖，基于地面覆盖的网络已经无法满足人们对通信的需求。

卫星通信网络具有空间跨度大、覆盖范围广、稳健性高、抗毁能力强等优势，构建地面网络与卫星通信网络融合的天地一体化信息网络架构符合未来网络的发展趋势。

20世纪90年代，国外以“Iridium”和“Global Star”为代表的计划掀起了卫星通信网络研究的热潮。经过21世纪前10年的冷静与思考，2010年起产业界与学术界又展开

了对天地一体化信息网络多层次、多角度的深入研究与产业实践。最具代表性的是SpaceX的“Starlink”计划，目的是打造低轨宽带卫星互联网巨型星座，截至2020年9月SpaceX已成功发射648颗在轨运行卫星；亚马逊的Kuiper计划明确提出用软件定义的系统架构实现高速、低时延的卫星宽带服务；2015年发起的VITAL项目，将NFV引入卫星—地面融合网络，并用SDN实现联合资源管理；2017年，SAT联盟成立并运行Sat5G项目^[1]，用于支持研究卫星通信网络与新一代5G通信网络的融合。

尽管卫星通信网络优势明显，但卫星通信网络规模庞大、复杂异构、拓扑高动态等一系列特点使得网络管理与资源配置挑战巨大；网络结构异构性强、星座拓扑

收稿日期：2020-10-09；修回日期：2020-11-10

通信作者：刘江，liujiang@bupt.edu.cn

基金项目：国家重点研发计划（No. 2019YFB1803103）

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No. 2019YFB1803103)

与星间链路频繁变化,使得控制系统需要具备敏捷重构的能力;同时由于卫星通信网络环境复杂,星载计算能力和存储容量十分有限,因此需要根据业务需求对卫星通信网络进行精细的资源配置。

2 基于SDN的卫星通信网络架构

将SDN的思想引入卫星通信网络中,可以分离卫星通信网络的数据平面和控制平面,由控制平面来进行复杂的路由计算、资源管理等操作,剩余卫星节点只需要进行简单的硬件配置和数据报的转发,降低了卫星建设成本以及对星上计算和处理能力的要求。由于控制平面集中式的管理方式,能够实现实时更新网络状态、部署细粒度管理策略、灵活网络部署和资源调度。同时控制平面可以跨域协调网络资源,从而屏蔽异构网络底层的差异性。

根据卫星轨道高度可以将其分为3类,即GEO、MEO和LEO卫星。其中 GEO卫星的工作轨道为36 000 km, MEO卫星的工作轨道为10 000~20 000 km, LEO卫星的工作轨道为500~1 500 km。下面分别介绍不同卫星通信网络架构类型的部署方案,并在表1中对所有方案进行汇总和比较。

2.1 基于SDN的LEO单层卫星通信网络架构

LEO卫星的轨道高度较低,相对其他高轨卫星,其信号衰减和传输时延较小,可以满足绝大部分业务的通信质量要求。但较低的高度导致了其单星覆盖范围较小,仅LEO单层卫星进行组网的布局比较分散,网络管理和控制较为困难。因此在较大规模的LEO单层卫星通信网络中,引入SDN可以增强网络的管理控制能力,结合卫星通信网络组管理方法实现进一步优化^[2-3]。

王朱伟等^[4]对大规模卫星通信网络进行分集群管理,并引入SDN实现数据传输与控制分离。其中SDN控制器实

时观测卫星通信网络状态,负责网络信息的收集和指令下发,地面控制中心计算资源分配策略后通过SDN控制器传回卫星通信网络。集中式的控制提高了卫星资源分配的效率,同时节省了星上资源,减少星上的计算压力。

ZHU等^[5]设计了主控制器与从控制器结合的网络架构。通过对地球表面进行固定逻辑地址的区域划分,将卫星通信网络划分为具有对应从属控制器的多个子网,子网内卫星的数量受纬度影响。从控制器负责收集对应子网的网络状态信息,并上传到主控制器;主控制器根据全局网络状态,管理卫星通信网络拓扑并计算多个子网间的路由路径。对于仅在子网内转发的数据报,由从控制器执行路由计算。卫星仅实现路由转发功能,最大程度降低对星上处理能力的要求。

2.2 基于SDN的GEO/LEO双层卫星通信网络架构

由于LEO卫星较快的运行速度会产生较大的多普勒频移,导致频繁的波束切换的同时产生额外的传输损耗和信令开销。GEO卫星具有较大的服务区域,可以减少一定的切换时间,但其轨道位置较高,带来较长的传输时延,不适合时延敏感服务。因此对LEO层和GEO层卫星进行联合组网,从而实现互补结合。引入SDN后,GEO层控制器与地面控制器可以同时同步收集网络信息,能够更加准确地发现和预测网络故障,及时做出应对。

袁梦珠^[6]将分组管理的概念与SDN集中控制思想相结合,地面控制器具有全局调度的能力,能够获取整体网络状态信息,合理分配网络资源。地面控制器计算出每个LEO卫星的所属群组,GEO卫星作为地面控制器和LEO卫星节点之间的中转站。地面控制器可以通过GEO卫星收集各组的卫星状态信息,同时GEO卫星向LEO卫星下发地面控制器的路由决策。借助SDN架构实现了更强的网络控制能力和感知能力,使网络能够满足不同业务的各种需求。

为满足不同空间任务的传输需求,石晓东等^[7]将SDN的思想与新一代LEO卫星通信网络相结合,实现对网络更

表1 基于SDN的卫星通信网络架构方案

架构类型	参考文献	时间	控制平面	数据平面	控制模式	灵活性	复杂性
单层卫星通信网络	[4]	2018年	地面局部控制器、地面控制中心	LEO	集中式	低	中
	[5]	2017年	地面主从控制器	LEO	集中式	低	低
双层卫星通信网络	[6]	2017年	地面控制器、GEO中介	LEO	集中式	低	中
	[7]	2020年	GEO控制器	LEO	集中式	中	低
	[8]	2016年	地面控制器、GEO中介	LEO	集中式	低	中
三层卫星通信网络	[9]	2018年	GEO主控制器、地面备份控制器、GEO局部控制器	MEO/LEO	集中式	高	中
	[10]	2018年	GEO控制器、卫星网关控制器、地面管理中心	MEO/LEO	分布式	高	高
	[11]	2019年	高空平台控制器、GEO控制器、地面控制器+管理中心	低层卫星	分布式	高	高

加灵活的监控和管理。控制层由GEO卫星节点组成,通过获取整个网络中所有LEO节点的信息和实时数据流生成全局网络视图,进而对网络进行计算和管理。LEO卫星节点构成数据层,负责按照控制层下发的流表进行数据报的选路转发。通过卫星通信网络的细粒度管理,实现了全局资源的统一调控,提高网络的QoS性能。

不同于单层控制器的架构设计,杨诗琪^[8]不仅将GEO卫星作为LEO卫星与控制器通信的中继节点,同时将GEO卫星作为二级控制器对覆盖区域的低层卫星进行控制。位于同一域内的数据报,由对应的GEO节点进行路由计算并执行转发决策,若源目的节点位于不同域内,GEO控制器生成流表向地面请求协议,由具有全局视野的地面控制器根据网络状态进行路径分配,GEO充当中介实现LEO卫星与地面控制器间的交互。

2.3 基于SDN的GEO/MEO/LEO 3层卫星通信网络架构

随着业务种类的增加以及流量分布不均的情况出现,数据平面的LEO层通信负担加重,发生网络拥塞和故障的概率大大增加了。由于GEO轨道位置有限,LEO单层和GEO/LEO双层的组网架构略显单薄,因此提出了较为复杂的GEO/MEO/LEO 3层架构。MEO卫星的特性介于GEO和LEO卫星之间,因此令其分担GEO层和LEO层的角色都是可行的。在现有研究中,其最典型的用途是提供局部控制、中继传输和回程服务,借助SDN技术实现的架构比前两类要更为复杂。

杨虹^[9]提出了基于SDN的主备控制器部署方案,提高网络可靠性,同时减少卫星通信网络和地面之间由于过多转发造成的时延。该方案将LEO卫星和MEO卫星作为数据平面,地面和GEO卫星共同作为控制平面,地面控制器作为GEO主控制器的备份控制器。对GEO卫星进行层次化分组管理,划分多个局部控制器分组管理LEO层卫星,同时多个局部控制器之间不进行交互,只统一汇集到主控制器进行全局管理,集中式控制降低了网络管理的复杂性,减少了信令开销,解决了卫星节点载荷受限的问题。

LI等^[10]基于SDN和NFV提出了一种天地一体化的卫星架构,包含数据层、控制层和管理层3个平面,以此来实现灵活的卫星通信网络流量工程和细粒度的QoS保障。管理层在地面上部署了卫星通信网络管理中心(Satellite Network Management Center, SNMC),负责进行全网资源收集以及策略下发。控制层分别部署在GEO卫星、卫星网关和地面网络,并统一受到SNMC的集中管理。LEO和MEO卫星将信息汇集到GEO控制器,再通过各层控制器传给SNMC;SNMC计算后将控制信息反向传送给数据

平面的LEO和MEO卫星。集中化的SDN分层架构能够实现整个网络的管控,可以进一步引入服务质量保障指标,实现服务质量与网络性能的优化。

SHI等^[11]提出了一种跨域SDN架构,可以为各种应用和业务提供动态灵活的服务。该架构在卫星域、无人机域等多个网络内部进行分层,控制器分别部署在GEO卫星、高空无人机平台以及地面,即在平面内的高层节点上部署控制器,从而管控各平面内的低层节点。地面主控制器通过东西向接口与地面、GEO卫星和高空无人机3个平台的多个局部控制器进行通信的协同管控。多级控制器的模式实现了分布式的逻辑集中控制架构,增强了系统的兼容性和扩展性,能够显著减少配置更新及决策控制的时间和开销。

3 基于SDN的卫星通信网络关键技术

3.1 卫星通信网络路由策略

卫星通信网络拓扑具有周期性动态变化的特点,受到宇宙辐射等因素的影响,卫星节点和链路的状态波动更加频繁,时延抖动和数据报丢失等问题更加严重,且星上有效载荷和链路资源有限,星载路由计算面临着重重挑战。未来随着卫星数量的增加和网络规模的扩大,卫星通信网络将承载更多的业务,多样业务对服务质量的需求各异,对能耗和故障处理能力等方面都有着较高的要求,如何设计卫星路由策略成为至关重要的问题。

(1) 传统卫星通信网络路由策略

传统卫星通信网络中路由策略大多采用组管理方法以及局部路由表更新的方式。齐小刚等^[12]改进了划分卫星足印的虚拟节点策略,并采用分组管理的思想,使GEO层管理卫星能够准确获得LEO层卫星的拓扑。在计算路由时,仅GEO层进行组与组之间的路由表更新和路径规划,LEO层卫星只负责数据报的转发,在提升网络性能的同时大大减小了存储开销。张泰江等^[13]针对星间链路频繁中断和端到端大时延的问题,对GEO/LEO双层卫星通信网络进行分层分簇设计。在LEO层建立从源卫星到目的卫星的多路径,当LEO层出现网络拥塞时利用GEO层实现数据分层传输,减少了网络中故障的发生概率。

ZHU等^[14]针对LEO/MEO双层卫星通信网络,结合虚拟节点和虚拟拓扑策略来消除卫星动态,考虑服务分级和链路故障概率,以更好地满足不同服务的QoS需求。通过使用主备链路不相交的方法减小重路由造成的损失,在LEO层使用泛洪算法将低时延敏感服务转发到MEO层,能够有效降低传输时延和丢包率。

在李贺武等^[15]的研究中,考虑到卫星路由与地面路由机制融合的难度,在地面基于IP的分布式路由的基础上

进行了改进,用更低的开销构建天地一体化信息网络。利用基于地理位置信息的IP编址策略,在计算路由时无须与邻居卫星交换信息,仅需要从IP地址中获取到目的位置,根据计算出的相对方位选择最优的接口进行转发。将分布式的路由计算结果存储到临时路由表中,当卫星与目的地址相对位置发生改变时,更新临时路由表。

(2) 基于SDN的卫星通信网络路由策略

将SDN架构引入卫星路由后,能够通过控制器集中收集卫星节点和链路的实时状态,获取网络的全局视图,掌握整个网络的变化情况。控制平面由地面数据中心和高层GEO或MEO卫星组成,数据平面由底层MEO或LEO卫星组成。控制器统一收集网络信息并计算路由策略,数据平面的卫星根据收到的路由策略进行转发,大大降低了底层卫星节点的计算压力,减少了网络中的信令交换开销。

杨力等^[16]提出了一种基于SDN架构的空间信息网络路由策略,由控制平面记录当前时刻整个网络的链路状态,获取源目的卫星节点间的路由集合。建立路由由计算模型确定不同业务中路由参数的权重,并采用改进的遗传算法计算链路代价最小的路由。数据平面根据计算出的路由转发数据,每个时间周期都进行静态拓扑的更新。

针对多层卫星通信网络,贾梦瑶等^[17]引入SDN技术,通过放置中央控制器来有效监测和控制整个网络状态。地面中央控制器负责链路状态维护和路由计算,GEO层负责收集MEO层上传的网络状态信息并广播给地面控制中心。设计基于故障块的容错路由算法,LEO层负责根据地面控制器上传的路由表进行数据转发,MEO层作为局部控制器,收集底层网络信息,同时预测网络故障,及时启用托管传输机制。

在刘之莹等^[18]的工作中,地面和GEO层共同组成控制平面,地面和天基控制器的互补不仅缓解了星上计算压力,并且弥补了地面站无法实时监控的缺陷。地面控制中心基于地面用户数量与主机分布,构建地面流量请求模型来预测星上流量需求,基于预测结果设计预计节能路由算法,在降低网络能耗的同时优化了路径决策,GEO层卫星负责收集网络状态信息以及下发路由指令,LEO层卫星仅作为交换机来转发数据。

石晓东等^[7]将GEO层卫星作为控制器,负责监控和收集整个网络的信息,实现网络细粒度的集中管理。建立多QoS约束的卫星通信网络模型,动态更新各链路属性的权重,控制器根据历史情况及加权和来选择最优路由,进行实时信息的有效反馈。LEO卫星节点负责根据控制器下发的流表进行数据处理与转发,无须进行额外的网络状态信息交换,有效减轻LEO层节点的负担。

3.2 卫星通信网络切换与移动性管理

卫星通信网络中,LEO卫星运动的速度远高于地面移动节点的速度,卫星通信网络与地面网络之间的连接状态不断变化。星地链路的频繁切换会导致管理开销增加,需要解决跨卫星点波束和链路的切换管理问题。因此,如何设计切换策略以最小化切换频次和节省开销是卫星通信网络中的一项关键研究。

(1) 传统卫星通信网络移动性管理

目前的移动性管理研究方法大都采用预判避免的思路,根据卫星运动方向和实时链路参数进行数学计算,来预测当前链路生存时间或下次切换的发生时间。王璇等^[19]依据卫星运动轨迹来预测星间链路的可用时间,从而判断当前传输路径的可用寿命。基于周期性的拓扑探测算法,在当前路径断开之前及时寻找备用路径,避免因路径切换而导致传输中断,但该算法只对正在通信中的节点进行预测,减少网络中多余的信令传输。

考虑到低轨卫星移动通信系统中邻区列表动态变化导致邻区测量存在较大的不确定性,沈俊等^[20]设计了一种波束小区切换准则。基于波束可视时间与接收信号强度推导信号的时变表达式,通过该式来预测切换的触发时间,进一步计算终端的邻区列表,并针对重复切换的情形设置同一波束切换次数上限,能够有效避免“乒乓切换”的发生。

董彦磊等^[21]将属于同一低轨卫星覆盖范围的区域设作为一个移动代理域,域内的所有卫星节点协同管理域内用户,支持域内的周期性信息交互共享。域内的用户以最长视距准则选定托管移动外地代理(Mobile Foreign Agent of Trusteeship, MFAT)卫星,负责维护用户在该域内的绑定关系信息;以最长滞留时间准则选定归属移动外地代理(Mobile Foreign Agent of Attachment, MFAA)卫星,负责代理用户兴建切换的相关移动指令。用户的域内切换只需更新其域内转发关系,仅在其MFAA变更的情况下,才会触发用户到家乡代理的绑定更新。该机制减少了信息交互、管理开销与切换时延,降低了对地面站部署数量和位置的需求。

(2) 基于SDN的卫星通信网络移动性管理方案

传统卫星通信网络的移动性管理大多基于分布式的策略,根据各卫星节点反馈到各地面站的信息来进行计算预测和切换管理,存在较大的时延,也无法及时应对网络中的突发状况。

在YANG等^[22]的工作中,提出了一种基于SDN的无缝切换机制,由地面控制器进行网络状态信息的统一收集和集中控制,低轨LEO卫星只负责数据平面的交换机角色。在地面部署存储所用用户终端和LEO卫星地址的

中心存储器,用户终端选择信号最强的链路作为主通信链路并进行登记。用户终端可以同时连接多个卫星,周期性测量不同卫星接收信号的强度,可以在发生切换前进行链路的变更。当用户终端的主通信链路改变时,立刻向位置服务器报告并通过控制器进行全网信息更新,在切换时延、吞吐量方面都得到了改善。

李恒智等^[23]提出基于SDN的卫星分布式移动管理方案,实现移动用户节点的分布式管理,在控制器中进行所有的位置管理及地址切换等操作。设计位置管理更新过程,当卫星或地面移动节点移动到新的位置时,发送注册信息到最近的地面网关,SDN控制器统一对所有的网关进行位置信息同步和更新。同时控制器将缓存报文转移到新的地面站,实现接入卫星的地址唯一性,减少管理开销。

WU等^[24]建立了基于二分图框架的卫星资源共享博弈模型,地面移动终端随时在竞争卫星资源和可用信道,通过最大化移动终端收益的切换算法为新的移动终端接入LEO卫星通信网络选择合适的卫星和频道。同时提出了基于用户空间最大化目标的随机接入算法,根据地理位置设置接入移动终端时的决策。两种算法相结合获得了移动终端的最大利益,以上计算和存储过程在地面的位置服务器中进行。

张珊珊^[25]基于网络分层和SDN控制策略,采用星上分布式控制器划分多个子网,将卫星按照轨道平面进行分组,实现组内自治,能够避免控制器与交换机之间发生频繁的切换。充分利用卫星运动特点和SDN简化的信令,设计了一套卫星切换流程,提前预测切换时间和下一跳卫星,避免了切换时频繁信令交换带来的传输时延,能够更好地适应卫星通信网络高时延的场景,同时能缩短链路质量下降的时间。

3.3 卫星通信网络负载均衡

卫星通信网络的流量经由地面网络上传,受限于地理环境、人口分布的特点,星上负载在时间与地区上呈现差异性。网络负载分布不均易造成在网络中存在大量闲置节点的情况下,部分节点发生拥塞导致吞吐量大幅度降低。因此如何有效地进行负载均衡,使网络平稳运行成为卫星通信网络的一项重要研究。

(1) 传统卫星通信网络负载均衡

传统的卫星通信网络在应对负载分布不均问题上大致可分为两类:在网络发生拥塞后被动采用多路径算法,通过增加链路或切换节点实现负载均衡;主动预测网络中的流量分布并判断是否会产生拥塞,预先采用流量均衡机制避免拥塞发生。

针对被动多径路由负载均衡方案,SONG等^[26]使用一组红绿灯来指示当前节点与下一节点拥塞状态,提出一种多径路由策略TLR。卫星依据输出链路的拥塞状态和下一节点链路状态的情况实时调整路由。卫星存储双径路由表,原始链路发生拥塞时选取备用路径进行转发,若均产生拥塞,则存入公共队列等待链路恢复。备份多路径的方式有效缓解局部的拥塞状态,但不具备全局最优的能力。

针对主动流量均衡机制,郭俞江^[27]采用拥塞预估和路径代价变化的思想,让卫星节点在负载较重时尽可能地分散数据报到相邻负载较轻的节点进行转发,以此降低数据报在卫星节点中的排队时延。通过对全球的网络数据进行流量预估,并在每个时间段内进行流量检测,综合考虑负载代价与时延代价进行最短路径计算,从网络的拥塞情况出发,尽可能选取空闲链路传输数据以实现负载分流。本算法不需要获取邻接卫星的负载情况,存储开销较小。

针对GEO/LEO的双层架构,NISHIYAMA等^[28]定义两种状态来描述卫星拥塞的概率,根据卫星轨道与拥塞区域间的位置关系预测网络拥塞的发生。对于正常状态的卫星无须进行负载均衡处理,而位于拥塞警告状态的卫星需要通知临近卫星进行改道处理。同时将卫星的数据报按照时间敏感程度赋予不同的优先级。优先级最高的A类数据无须进行改道,B类数据在LEO层进行路径切换,而对于时间最不敏感的C类数据需要转移到GEO层进行转发。算法在优化QoS的基础上,达到了平衡网络负载的目的,但需要对节点中的数据进行队列检查,网络的开销较大。

(2) 基于SDN的卫星通信网络负载均衡

传统的卫星通信网络基于拥塞节点与其周边节点的情况进行流量调度,其分布式的负载均衡的方式往往只能对局部进行改善,缺乏对卫星通信网络全局流量的均衡。SDN具有控制与承载分离的特性,相较传统网络更容易获得全局网络拓扑,通过控制器的负载均衡,易于制定全局最优的策略。

基于SDN的控制器对全局网络和负载状况的掌握,孙伟超等^[29]提出基于虚拟拓扑的包含必经节点的天基网络路由算法。在地面网络部署SDN控制器负责对全网拓扑和节点信息进行管控,GEO作为LEO与地面控制器通信的中继节点,LEO作为数据层实现路由转发。设定数据转发时的必经节点,并利用DFS与Dijkstra算法进行路径计算,改善部分节点负载过大,而其他节点闲置的问题,有效均衡网络负载。

为解决SDN/NFV协同部署卫星通信网络中拓扑变化

和服务请求实时变化导致的负载分布不均问题，PAN等^[30]提出基于Viterbi算法的负载平衡算法，将SFC的映射过程建立为隐藏的马尔可夫模型，考虑迁移成本与迁移约束，将过载节点的VNF资源迁移到其他合适的节点，并将迁移矩阵添加到状态转移矩阵，实现多目标的优化。

在吴舫^[31]的工作中，不仅进行链路的负载均衡，同时实现应用层的负载均衡。利用SDN集中控制的特性，通过定期发送协议获取全局网络拓扑，选出最优的K条冗余链路，再根据评价模型选择最有利于当前网络负载的链路。对于应用层的负载问题，对用户请求的频次、网络时延、丢包率等参数进行数据采集，根据用户的评分模型设定优先级别；控制器根据优先级提供不同的转发策略，实现为用户按需分配服务资源。

对于引入SDN的卫星通信网络，除卫星链路间的负载均衡，还需考虑各局部控制器间的负载问题。杨虹^[9]建立控制器层次部署的模型，由地面网络与GEO作为控制平面，LEO与MEO作为数据平面，同时将GEO控制器分为主控制器与局部控制器，地面控制层作为GEO主控制器的备份。局部控制器与主控制器协同工作，根据负载情况动态调整控制器与交换机间的关系。按照局部控制器的负载情况，由主控制器选择需要执行迁移的原控制器与负载较小的归属控制器，并将原控制器中的交换机进行负载权衡，选择合适的交换机进行迁移。因此控制器的部署对卫星通信网络的负载均衡具有较大影响。

4 结束语

SDN给卫星通信网络带来了新的发展动力，基于SDN的数控分离、软件可编程思想使得卫星通信网络数据平面设备要求降低，可将更多的资源集中于数据平面转发。同时，基于SDN软件化的集中控制使得卫星通信网络的管理与控制难度极大降低；软件可编程的能力也使得网络的管理者能够根据业务的需求对网络资源进行灵活的调度与控制。

尽管基于SDN的卫星通信网络研究取得了显著的发展，但是由于卫星通信网络规模过于庞大，基于SDN的卫星通信网络也面临一系列的挑战。针对规模巨大的星座，无论是星座轨道还是网络拓扑的管理，都需要建立有效的分级分域SDN卫星通信网络架构，保证系统的可扩展性。同时，不同于地面网络基于用户终端的移动性管理策略，卫星通信网络存在着路由节点的移动性；如何在SDN架构下实现有效的移动性管理与切换是一个重要的问题。此外，针对大规模周期性变化星座，需要研究高效的路由协议与路由算法，减少SDN卫星通信网络

路由信令开销，减少路由回环对网络效率与服务质量的影响，实现实时可靠的路由更新，保证路由成功率。除此之外，针对大规模的星座，基于SDN的卫星通信网络需要高效的网络监测与管理工具，可以实现大规模网络资源的精细配置，同时可以对网络故障做出敏捷反应。最后，针对多样的用户请求和业务特性，如何在动态拓扑的网络场景下，设计满足卫星通信特性的服务质量保障机制，比如网络虚拟化、网络切片等，将是重要的研究方向。

基于SDN的卫星通信网络具有重要的研究意义和广阔的发展前景，逐渐落地的技术应用和商业项目给了科研人员更多的动力和希望，与此同时存在许多亟待解决的困难和挑战，需要多方努力来推动基于SDN卫星通信网络的进一步发展。

参考文献：

- [1] LIOLIS K, GEURTZ A, SPERBER R, et al. Use cases and scenarios of 5G integrated satellite-terrestrial networks for enhanced mobile broadband: The SaT5G approach[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2019, 37(2): 91-112.
- [2] KREUTZ D, RAMOS F M, VERISSIMO P E, et al. Software-defined networking: A comprehensive survey[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 103(1): 14-76.
- [3] BAO J, ZHAO B, YU W, et al. OpenSAN: a software-defined satellite network architecture[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(4):347-348.
- [4] 王朱伟, 徐广书, 买天乐, 等. 基于AI的LEO卫星网络资源管理架构设计[J]. 信息技术与网络安全, 2018, 37(2): 20-22+36.
WANG Z W, XU G S, MAI T L, et al. Design of LEO satellite network resource management architecture based on AI[J]. Information Technology and Network Security, 2018, 37(2): 20-22+36.
- [5] ZHU Y, QIAN L, DING L, et al. Software defined routing algorithm in LEO satellite networks[C]//2017 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICELTICs). Piscataway: IEEE Press, 2017:257-262.
- [6] 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.
- [7] 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 & Electronics, 2020, 42(6): 1395-1401.
- [8] 杨诗琦. 软件定义卫星网络架构设计研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- YANG S Q. Research on software-defined satellite network architecture[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [9] 杨虹. 面向复杂空天地一体化网络的SDN控制器的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- YANG H. Research on SDN controller for complex space-earth integration network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [10] LI T, ZHOU H, LUO H, et al. SERvICE: a software defined framework for integrated space-terrestrial satellite communication[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 17(3): 703-716.
- [11] SHI Y, CAO Y, LIU J, et al. A cross-domain SDN architecture for multi-layered space-terrestrial integrated networks[J]. IEEE Network, 2019, 33(1): 29-35.
- [12] 齐小刚, 马久龙, 刘立芳. 基于拓扑控制的卫星网络路由优化[J]. 通信学报, 2018, 39(2): 11-20.
- QI X G, MA J L, LIU L F. Routing optimization based on topology control in satellite network[J]. Journal on Communications, 2018, 39(2): 11-20.
- [13] 张泰江, 李勇军, 赵尚弘. 基于GEO/LEO双层卫星网络的路由算法优化设计[J]. 计算机工程, 2020, 46(7): 198-205.
- ZHANG T J, LI Y J, ZHAO S H. Optimization design of routing algorithm based on GEO/LEO double-Layer satellite network[J]. Computer Engineering, 2020, 46(7): 198-205.
- [14] ZHU Y, RUI L, QIU X, 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). Piscataway: IEEE Press, 2019:1518-1523.
- [15] 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.
- [16] 杨力, 滕奇秀, 孔志翔, 等. 基于SDN架构的空间信息网络路由策略设计[J]. 航天器工程, 2019, 28(5): 54-61.
- YANG L, TENG Q X, KONG Z X, et al. Design of spatial information network routing strategy based on SDN architecture[J]. Spacecraft Engineering, 2019, 28(5): 54-61.
- [17] 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.
- [18] 刘之莹, 王兴伟, 徐双, 等. 基于预计算的软件定义卫星网络节能路由[J]. 网络空间安全, 2019, 10(11): 100-109.
- LIU Z Y, WANG X W, XU S, et al. Precomputation based energy-saving routing for software defined satellite networks[J]. Cyberspace Security, 2019, 10(11): 100-109.
- [19] 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+109.
- WANG X, HOU R H, XU W L. Dynamic path switching technology for LEO satellite networks[J]. Journal of Beijing University of Posts Telecommunications, 2020, 43(2): 80-86+109.
- [20] 沈俊, 陈曦, 赵新胜. 低轨卫星通信系统中的一种波束小区切换算法[J]. 电讯技术, 2020, 60(4): 439-447.
- SHEN J, CHEN X, ZHAO X S. A spot beam cell handover algorithm in LEO satellite communication system[J]. Telecommunication Engineering, 2020, 60(4): 439-447.
- [21] 董彦磊, 李东昂, 刘勤, 等. 面向动态外地代理的卫星网络移动性管理机制[J]. 西安电子科技大学学报, 2018, 45(3): 156-162.
- DONG Y L, LI D A, LIU Q, et al. Research on mobility management strategy based on the mobile foreign agent domain in satellite networks[J]. Journal of Xidian University, 2018, 45(3): 156-162.
- [22] YANG B, WU Y, CHU X, et al. Seamless handover in software-defined satellite networking[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(9): 1768-1771.
- [23] 李恒智, 王春锋, 王为众, 等. 基于 SDN 的卫星网络分布式移动管理研究[J]. 通信学报, 2017, 38(S1): 143-150.
- LI H Z, WANG C F, WANG W Z, et al. Research on distributed mobile management of satellite network based on software define network[J]. Journal on Communications, 2017, 38(S1): 143-150.
- [24] WU Y, HU G, JIN F, et al. A satellite handover strategy based on the potential game in LEO satellite networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 133641-133652.
- [25] 张姗姗. 基于软件定义卫星网络的低轨卫星切换策略研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- ZHANG S S. Research on low earth orbit satellite handover strategy

based on software-defined satellite network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.

- [26] SONG G, CHAO M, YANG B, et al. TLR: a traffic-light-based intelligent routing strategy for N GEO satellite IP networks[J]. 2014, 13(6): 3380-3393.
- [27] 郭俞江. 面向多层卫星网络的负载均衡路由算法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.
GUO Y J. Research of load balanced routing protocol based on multilayer satellite network[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015.
- [28] NISHIYAMA H, KUDOH D, KATO N, et al. Load balancing and QoS provisioning based on congestion prediction for GEO/LEO hybrid satellite networks[J]. Journal & Magazines, 2011, 99(11): 1998-2007.
- [29] 孙伟超, 梁俊, 肖楠, 等. 基于SDN和虚拟拓扑的天基网络路由算法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(1): 125-128.
SUN W C, LIANG J, XIAO N, et al. Routing algorithm for space-based network based on SDN and virtual topology[J]. Transducer and Microsystem Technology, 2020, 39(1): 125-128.
- [30] PAN C, SHI J, YANG L, et al. Satellite network load balancing strategy for SDN/NFV collaborative deployment[C]//2019 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Cloud & Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation (SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCOM/IOP/SCI). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1406-1411.
- [31] 吴舫. 一种基于SDN的网络负载均衡方案的设计与实现[D]. 上海: 复旦大学, 2014.
WU C. Design and implementation of a network load balancing scheme based on SDN[D]. Shanghai: Fudan University, 2014.

[作者简介]



杨丹（1998-），女，北京邮电大学网络与交换国家重点实验室硕士生，主要研究方向为网络虚拟化、软件定义网络与卫星网络。



刘江（1983-），男，北京邮电大学副教授，IEEE会员，主要研究方向为网络架构、网络虚拟化、卫星网络、软件定义网络、信息中心网络与网络实验床。



张然（1993-），男，北京邮电大学网络与交换国家重点实验室博士生，IEEE学生会员，主要研究方向为计算、缓存与网络融合，命名数据网络，卫星网络，网络人工智能。



刘方琪（1998-），女，北京邮电大学网络与交换国家重点实验室硕士生，主要研究方向为低轨卫星网络与软件定义网络。



欧阳曼（1998-），女，北京邮电大学网络与交换国家重点实验室硕士生，主要研究方向为软件定义网络与卫星网络。



黄韬（1980-），男，北京邮电大学教授，IEEE高级会员，主要研究方向为网络架构、网络人工智能、路由与转发、网络虚拟化。