

空间卫星网络组网与管控技术综述

廖新悦¹, 张然^{1,2}, 黄正璇¹, 刘江^{1,2}, 唐琴琴¹, 黄韬^{1,2}

(1. 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 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: 随着航空航天技术以及卫星互联网技术的快速发展, 高速率、高带宽的卫星通信系统逐渐成为下一代移动通信体制的重要组成部分。卫星互联网的发展推进了卫星网络商业化进程, 低轨卫星成为构建卫星互联网的重要组成部分。如何实现大规模低轨卫星网络高效可靠的网络管控, 完成星地融合组网与路由, 逐渐成为了发展卫星互联网的前沿课题。近年来, 随着卫星网络规模逐渐扩大, 网络管控方法被大量提出。首先, 从国内外大规模卫星星座的发展现状出发, 调研已有的多种卫星网络的组网架构和协议体系; 然后, 根据现阶段大规模卫星网络的发展现状, 分析对其进行网络管控的难点和关键技术; 最后, 基于星地融合的组网方式, 对现有的解决方案进行调研与分析。

关键词: 星地融合网络; 低轨卫星网络; 网络管理与控制; 分域管控方法

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023030

Review on Networking and Control Technologies of Space Satellite Network

LIAO Xinyue¹, ZHANG Ran^{1,2}, HUANG Zhengxuan¹, LIU Jiang^{1,2}, TANG Qinqin¹, HUANG Tao^{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: With the rapid advancement of aerospace technology and satellite internet, high-speed and high-bandwidth satellite communication systems have gradually become an essential component of the next-generation mobile communication infrastructure. The trend in the development of satellite internet has propelled the commercialization process of satellite networks, with low earth orbit satellites playing a significant role in constructing satellite internet. The efficient and reliable network management of large-scale low earth orbit satellite networks, along with the integration of space and ground routing, has gradually emerged as a cutting-edge issue in the development of integrated aerospace networks. In recent years, as satellite networks have expanded in scale, numerous network management methods have been proposed. Firstly, begun by examining the development status of large-scale satellite constellations both domestically and internationally, surveying the existing network architecture and protocol systems of various satellite networks. Subsequently, based on the current development status of large-scale satellite networks, the challenges and key technologies involved in satellite management were analyzed. Finally, built upon the network integration of space and ground, existing solutions were extensively researched and analyzed.

Keywords: integration of satellite and terrestrial network, LEO satellite network, management and control of the network, subdomain control methodology

收稿日期: 2023-04-07; 修回日期: 2023-08-11

通信作者: 张然, zhangran@bupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No.62171064)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.62171064)

0 引言

随着人类生产生活对通信服务需求的逐渐提高,传统移动通信网络和地面固定网络由于覆盖范围有限、网络扩展性差、抗毁能力弱等缺陷,已逐渐不能完全满足人类社会的发展需求。全球现有的移动网络仅覆盖陆地面积的 20%、地表面积的 6%,航空、远洋、渔业、石油、环境监测、户外越野等特殊区域的通信需求依靠卫星通信满足。

在 2G 到 5G 的发展时期,卫星通信的首要需求是实现全球覆盖。因此,卫星通信以中窄带、中高轨道卫星为主,能够以较少数量的卫星完成全球覆盖,实现对蜂窝网络覆盖区域的补充。2021 年,中国 IMT-2030(6G)推进组发布的《6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书》^[1]提出建设全球广域覆盖的卫星互联网,实现全球通信网络的全域覆盖与无缝连接,同时通过互联网技术实现互联网、移动通信网络、空间网络的互联互通^[2],构建融合网络,实现自然空间全覆盖和全球全域的“泛在连接”,星地融合通信已是目前通信技术的重要发展方向。

由多层卫星网络结合现有的移动通信网络,以及互联网接入技术构建的卫星互联网能够突破现有地面网络的覆盖范围局限,实现全球不间断信号覆盖,为全球用户提供大带宽、低时延、全覆盖的网络服务。大规模、低轨化、多层次的卫星网络是卫星互联网的重要组成部分。大规模星地融合网络具有海量节点、结构复杂、拓扑异构等特点,要充分利用卫星网络资源,对现有卫星进行最大化利用,对未来卫星网络进行科学合理部署,需要通过高效可靠的网络管控方式进行网络资源分配与调度,针对地面网络的传统网络管控方式在星上难以实现。因此,探究针对大规模星地融合网络的高效可靠的管控方式具有重要的研究意义。

1 国内外大规模卫星星座发展现状

1957 年苏联发射第一颗人造卫星^[1],激发了人们探索利用卫星进行通信的想法。20 世纪 60 年代初,美国提出了“通信卫星全球覆盖系统(COMSAT)^[3]”计划,旨在建立一个全球性的通信卫星网络。1962 年,美国发射了第一颗商业通信卫星——Telstar-1^[4],基于模拟通信系统实现了跨大西洋的电话通信。20 世纪 80 年代,通信卫星进入了数字通信时代,数字通信技术的发展使得通信卫星能够传输更多信息,数字通信系统提供了更高的带宽和更好的信号质量,能够实现语音、电视及广播信号的转发。

20 世纪 90 年代,随着在轨卫星数量的增加,卫星通信服务进入商用阶段,最具代表性的是 Iridium^[5]系统、Globalstar^[6]以及 Orbcomm^[7]系统,但由于卫星通信成本过高,且需求并不充分,当时的商用卫星系统并未得到充分利用,卫星通信技术的发展也受到阻碍。

进入 21 世纪以来,随着空间技术、移动通信技术以及互联网技术的蓬勃发展,构建宽带体制的卫星互联网逐渐成为了卫星通信技术研究的热门问题,大规模低轨卫星网络成为通信卫星网络的演进方向^[7]。学术界与工业界开始对卫星互联网展开研究与实践,全球多家公司提出了大规模低轨卫星的发射部署计划^[8]。美国 SpaceX 公司的“Starlink”计划^[9],截至 2023 年 7 月 25 日,Starlink 卫星发射数量达到 4 859 颗,约有 4 519 颗 Starlink 卫星在轨运行^[10];英国 OneWeb 公司的 OneWeb 一代互联网宽带卫星星座于 2023 年 5 月完成 18 次发射,共计 618 颗卫星在轨^[11];加拿大 Telesat 公司计划于 2025 年开始部署规模为 188 颗低轨卫星的“Lightspeed”星座^[13]。2020 年 9 月,中国向国际电信联盟(ITU)提交了名为“GW”的频谱分配档案,“GW”星座中包含两个名为“GW-A59”和“GW-2”的宽带低轨卫星子星座,其中“GW-A59”星座计划部署 6 090 颗极低轨道卫星,轨道高度约为 500 km;“GW-2”子星座计划部署 6 912 颗低轨卫星,轨道高度约为 1 200 km;“GW”星座计划发射卫星总数达 12 992 颗。

各国大规模低轨卫星星座呈现出大带宽、巨型化、低轨化的特征。

与地面网络相比,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。其中,低轨卫星具有低时延、高数据传输速率、低发射制造成本、抗干扰能力强、能够快速部署等诸多优势。因此,下一代通信卫星网络主要由诸多大规模低轨卫星星座构成。

随着网络的规模逐渐扩大,大规模卫星网络具有海量节点、复杂异构、高度动态的拓扑特征,如何对其进行高效可靠的网络管控是一大挑战。由于空间环境复杂,为保障卫星网络的灵活性和鲁棒性,需要控制系统具备快速重构能力。由于星上资源有限,需要控制系统对网络资源进行精细化分配与调度。

2 星地融合网络组网架构及协议体系

2.1 星地融合网络组网架构

随着空间技术与网络技术的发展,星上处理技术逐渐成熟,为星上动态组网、星地融合组网提供支持。星上转发技术的发展分为“弯管透明转发”“电路交换”“星上

IP 分组交换”3个阶段。随着星上转发技术的发展,星地网络间的联系逐渐紧密,空间网络与地面网络间的融合组网方式从“天星地网”“天基网络”向天地融合组网“天网地网”演进。随着星上转发技术以及网络管控能力的提升,卫星网络组网方式从传统卫星通信系统网络架构到基于软件定义网络(Software Defined Network, SDN)的星地融合组网架构,再到面向6G标准化的星地融合移动通信系统架构发展。下面根据卫星网络不同的发展阶段,分析卫星通信系统的组网方式。

(1) 传统卫星通信网络系统组网架构

传统卫星通信网络系统主要包含空间段、地面段和用户段,如图1所示。其中,空间段指由各类卫星组成的卫星网络,包括高轨(GEO)、中轨(MEO)、低轨(LEO)卫星及星间链路(Inter-Satellite Link, ISL),采用星上处理(On-Board Processing, OBP)技术以支持星上独立组网与路由;地面段包括信关站、网络控制中心等,信关站与卫星间通过馈电链路连接,用于实现星地间的数据上下行,以实现系统运维及与地面通信网络互联的功能;用户段包括各类地面终端用户,如车载终端、舰载终端和卫星电话等。

传统卫星通信网络系统组网方式能够有效地提高网络覆盖面积,实现对现有地面蜂窝网络的补充。然而星上采用传统地面网络基于分布式架构的管控方式,卫星节点不仅需要承载业务的数据交换与存储转发,还需要具备链路状态的收集与同步、路由表的计算与存储等一系列功能,极大地消耗了星上的计算资源。且随着网络规模的扩大,采用分布式架构的网络路由收敛速度缓慢,导致网络性能下降。

(2) 基于SDN的星地融合组网架构

随着卫星网络的规模逐渐扩大,海量节点使得网络管控难度增加,超大型卫星星座需要高效的网络管控方式来协调大规模的网络节点,将SDN“数控分离”的思想引入大规模卫星网络,可以提高网络的灵活性与可扩展性。

首先,通过将控制平面和数据平面分离,由控制平面进行复杂的路由计算与资源管理等控制功能,数据平面仅负责简单的硬件配置及数据转发功能,将控制中心部署在计算资源充足的地面或高层卫星,星上节点仅需具备解析控制信令以及数据报转发的能力,提升了卫星组网的灵活性与可扩展性,降低了对星上处理能力的要求与卫星网络的建设成本,节省了星上资源;其次,采用控制平面集中

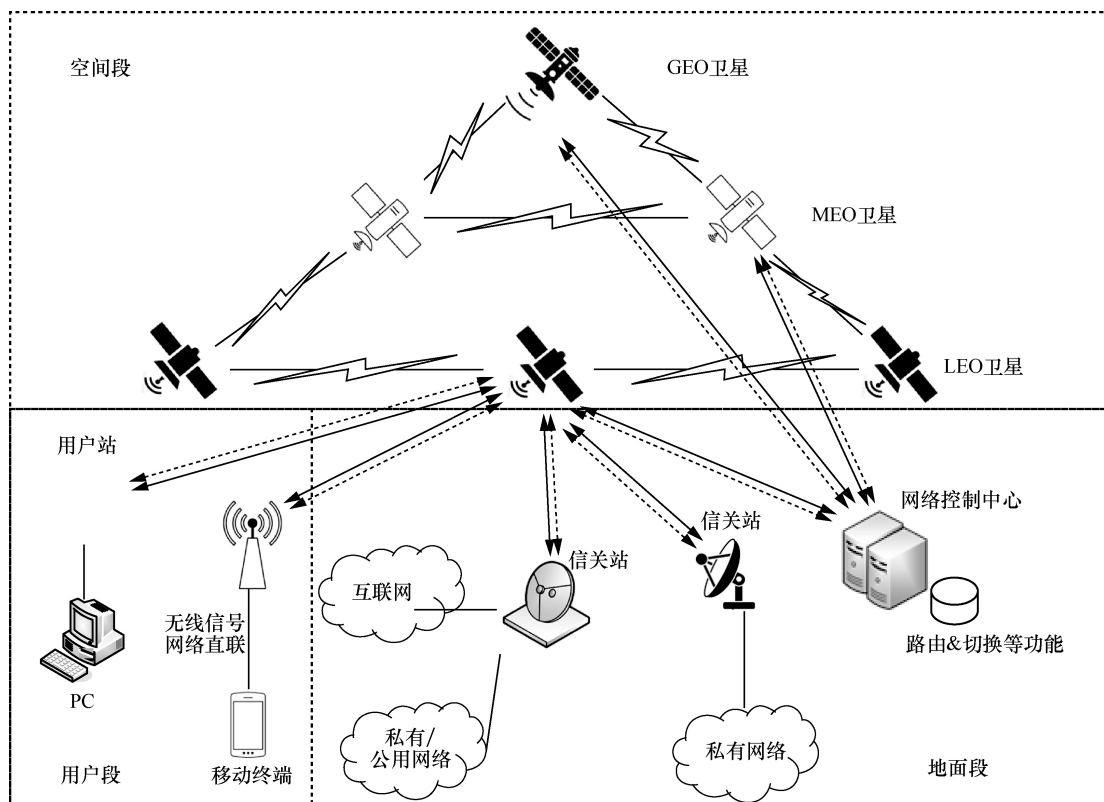


图1 传统卫星通信网络系统组网架构

管理的网络管控方式,逻辑集中的 SDN 控制平面能够获取网络全局视图,实时监测网络状态,并根据网络状态实施精细化管控策略,从而保障业务的服务质量,提升网络性能;再次,软件定义网络架构能够将星上软硬件解耦,打破了固有的软件对硬件的依赖关系,提高了软件升级的灵活性,同时消除了由硬件差异带来的网络异构,降低了网络更新成本,提高了网络的可编程性;最后,控制平面能够对网络资源统一管理并进行灵活调配,能够跨域协调网络资源,提升网络资源的利用率。

根据参与组网卫星的轨道高度以及网络的物理结构,可将卫星网络架构分为两种:LEO 单层卫星网络架构、LEO/GEO 或 LEO/MEO/GEO 多层卫星网络架构^[15]。下面分析两种网络架构及其基于 SDN 的控制器部署方式。

① LEO 单层卫星网络架构

近年来,各国建设的多数卫星星座都朝着低轨化、巨型化的方向演进,采用基于 SDN 的网络管控方式能够对节点众多、布局分散的大规模低轨卫星网络进行精细化管控,在此基础上引入网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV)技术,将网络服务与具体网元解耦,实现网络功能服务的灵活部署^[16-18]。

对于巨型低轨卫星网络,可以将卫星分组管理的思想与基于 SDN 的网络管控方式相结合。参考文献[19]首先对卫星进行分集群处理,对同一集群内的卫星进行批量管理,并在地面数据中心引入 SDN 的网络架构,将 SDN 控制器部署在地面数据中心网络中。当信关站接收到同一集群的卫星网络状态信息后,传输给与之最近的地面数据中心,通过地面数据中心网络共享到其他的数据中心。由此,每个集群的卫星网络状态信息都被实时共享到地面数据中心网络中进行集中式管理。

基于 SDN 的 LEO 单层卫星网络架构通常将控制器部署在地面节点,为保障地面控制器能够实时检测到每颗卫星,地面信关站及控制器的部署位置选择十分重要,且星地链路信道容易因为飞行物或云雨遮挡出现衰落,网络稳定性会受到一定影响,LEO 单层卫星网络的灵活性受到限制。

② LEO/MEO/GEO 多层卫星网络架构

LEO 卫星传输时延较低但具有高度动态性,将覆盖范围较大且动态性较低的高层轨道卫星与 LEO 卫星进行分层组网,更能够贴合 SDN 分层化管理的思路。参考文献[20]提出了基于 SDN 的星地分层管控架构 OpenSAN,将网络分为管理平面、控制平面与数据平面,将管理平面部署在地面数据中心,负责星上路由规则的计算、网络功能虚拟

化服务、移动性管理等,在 GEO 卫星上部署控制平面,负责数据平面路由规则的传递和星上链路状态信息的收集,LEO 卫星作为数据平面进行数据报的存储转发。OpenSAN 方案有效减少了地面站的数量,充分利用了 GEO 卫星的功能,提高了网络管控效率。SDN 分层的管控架构如图 2 所示。

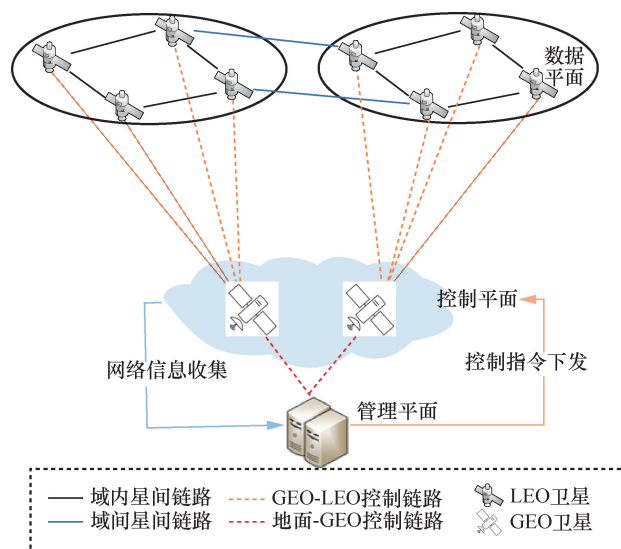


图2 SDN 分层的管控架构

参考文献[21]沿用了管理平面、控制平面、数据平面的 SDN 分层的管控逻辑,基于 LEO/MEO/GEO 3 层卫星网络提出了 SERvICE 架构,将控制平面部署在地面数据中心、GEO 控制器以及卫星网关控制器,在地面部署卫星网络管理平面中心(Satellite Network Management Center, SNMC),数据平面由低轨和中轨卫星组成。控制平面负责收集星上信息并传输至地面 SNMC,地面 SNMC 负责网络资源全局管理与全局视图的维护。

针对多层卫星网络的星地分层管控架构以及多层控制器的部署方案,能够实现对星地融合网络的集中管控,具备更高效的管理规划能力,更好地推进星地异构网络的融合与演进。

(3) 面向 6G 的星地融合移动通信系统架构

随着地面移动通信从 5G 向 6G 演进,以非地面网络(Non-Terrestrial Network, NTN)为代表的新型卫星互联网架构逐渐深化^[22],面向 6G 的星地融合移动通信系统架构^[23]融合了传统地面移动通信网络、低空接入网络与卫星通信网络,并促使各自独立的标准体系向统一方向融合发展,推进了卫星互联网的协议标准化演进,如图 3 所示。3GPP 在 R16 中定义了 8 个增强移动宽带场景和 2 个海量机器类通信场景,提出了支持 NTN 的空中接口方案以及 5G 新空

中接口参数,分析了卫星作为地面 5G 补充的可行性,并计划在下一版本标准方案中完成标准化工作。

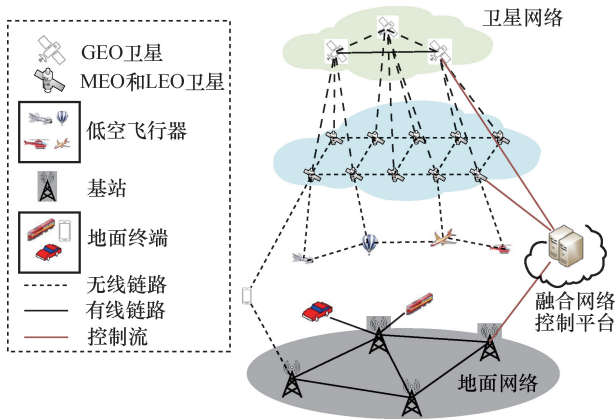


图 3 面向 6G 的星地融合移动通信系统架构

5G 的 NTN 部署场景见表 1。

表 1 5G 的 NTN 部署场景^[24]

平台	轨道高度	运行方式	典型覆盖尺寸
低轨卫星	300~1 500 km	绕地球旋转	100~1 000 km
中轨卫星	7000~25 000 km		100~1 000 km
静地轨道卫星	35 786 km	对于给定地球点,保持固定仰角/方位角	200~3 500 km
空中载体平台 (UAS) 包含高空通信平台 (High Altitude Platform Station, HAPS)	8~50 km HAPS 20 km		5~200 km
高轨卫星	400~50 000 km	椭圆轨道绕地球旋转	200~3 500 km

根据卫星在网络中承担的角色不同,可以将 5G 的 NTN 架构分为两种模式^[25]:透明转发模式与星载基站模式 (gNB)。透明转发模式下,卫星仅作为透传中继;星载基站模式下,卫星间可通过星间链路进行数据传输,能够减少信关站数量,有效扩展移动通信网络的覆盖范围。

2.2 星地融合网络协议体系

(1) TCP/IP 协议体系

TCP/IP 协议是目前应用最广泛的互联网通信协议,也是当前卫星网络接入全球互联网的主流方案。TCP/IP 协议体系的设计目的是实现现存网络间的互联互通,采用网络层寻址、路由与转发功能,实现全网可达性,采用 TCP 协议实现端到端的可靠性连接。在空间网络采用 TCP/IP 协议能够快速部署并实现星地网络的端到端通信,节约网络建设成本。

现阶段,已形成了如 IP 协议上星 (IP over Satellite, IPoS) 的星上 IP 协议部署方案;针对传统 TCP 协议难以适应较大时延、较高误码率的卫星信道的问题,采用 TCP

性能增强代理的方式可以大大提高传输性能。空间数据系统协商委员会 (Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS) 根据空间信道特征制定了空间通信协议规范 (Space Communications Protocol Specifications, SCPS)。

(2) CCSDS 协议体系

空间数据系统协商委员会协议是由国际空间数据系统协商委员会制定的空间通信标准协议,用于空间通信的数据交换、存储及通信需求。借鉴 TCP/IP 协议体系,CCSDS 同样包含了 5 层协议架构,其体系结构自下而上包括物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层,每一层都包含若干可组合协议。

其中,网络层协议除全新定义的空间分组协议 (Space Packet Protocol, SPP) 和空间通信协议规范-网络协议 (Space Communications Protocol Specification-Network Protocol, SCPS-NP) 外,还支持 IPv4 和 IPv6。

CCSDS 协议已成为国际上使用最广泛的空间通信协议标准之一,部分 CCSDS 协议已成为国际标准化组织的正式标准。CCSDS 协议现存问题体现在无法与地面网络协议进行直接互通,需要进行协议转换。

(3) DTN 协议体系

时延容忍网络 (Delay Tolerant Networks, DTN) 协议体系是一种用于时延容忍的网络通信协议体系,特别适用于无线和移动网络中存在不可靠连接和大时延的环境。DTN 协议体系基于存储转发的思想,允许节点在临时性的网络中存储和转发数据,以实现可靠的数据传输。

DTN 协议在 5 层体系架构的基础上,在应用层与传输层之间引入了覆盖层,并通过使用磁盘等永久存储的方式克服网络的间歇性连接问题^[26],覆盖层中的覆盖层协议用于将数据分段并在网络中进行存储和转发。

除此之外,DTN 还定义了多种路由协议,包括基于传染病模型的路由协议^[27]、基于随机投射和等待的路由协议^[28] (Spray-and-Wait Routing Protocol, SWRP)、基于遥传的路由协议等。

(4) NDN 协议体系

命名数据网络 (Named Data Networking, NDN) 协议体系是一种新型的网络通信协议体系^[29],以数据为中心,以数据命名为核心思想,与传统的基于主机的 IP 网络相比,将重点从主机和 IP 地址转移到数据本身。NDN 协议体系包括多个具体的协议和机制,用于支持命名数据的传输、路由和缓存。与传统的传输协议与互联网协议相比,NDN 具有内容寻址与高效缓存、数据高效分发、去中心化的网络自主性等优势^[30]。

3 卫星网络路由管控关键技术

随着星座规模的逐渐扩大,大规模星座网络面临以下挑战。

(1) 用户增加,难以维持细粒度管控

随着卫星网络规模的扩大,卫星网络逐渐成为卫星互联网的重要支撑部分,接入用户数急剧增加,用户的规模扩大,导致了需要维护的用户信息以及不同用户所需的业务状态变多。对于单个用户,维护开销包括表项开销、数据包 buffer 开销与数据包回传带宽开销。其中,表项开销与用户/业务规模以及卫星网络规模线性相关,中低频业务的星载数据包 buffer 开销非常高。一般采用压缩表项的方式解决用户/业务开销问题,但此类方法会导致管控粒度变粗。

(2) 最短路径算法难度增加

现有的卫星网络最短路径算法,通常是基于集中式或分布式的链路状态同步下的最短路径计算方法。其中,设网络中节点数为 n , Dijkstra 算法以给定点为根,生成到任意点的最短路径树,算法复杂度为 $o(n^2)$ 。Floyd 算法以动态规划的方式计算任意点到点之间的最短路径,算法复杂度为 $o(n^3)$ 。随着网络节点数增加至上万个,星上有限的计算资源无法承受大量计算开销,若进一步考虑等价多路径转发,计算时间将大大增加。

(3) 端到端路径可靠性降低

在采用激光构建星间链路的场景下,激光信号的空间自由传播损耗以及接收端因天线未对准而产生的附加噪声,使得星间激光链路的可用性小于 100%;同时,随着星座规模的扩大,卫星节点间的最大跳数即路径深度增加,随着路径深度的增加,端到端的可靠性逐渐降低。以上两种因素,导致业务传输路径和控制通道的可用性降低。

(4) 路由更新开销不断提高

以地面网络层路由协议 OSPF 为例,网络中各节点间建立邻居关系后通过交换链路状态信息来同步网络连接关系。在全网链路状态信息同步收敛后,各节点以自身为根节点,分布式计算到达任意点的最短路径。设网络节点数为 n , OSPF 用于同步链路状态信息的信息规模为 $o(n^2)$ 。

基于以上挑战,采用分层分域的网络架构能够降低决策与信息同步的规模,提高管控效率。

现有的网络管控方法总体思路是“分而治之”,通过将大规模卫星网络节点划为多个“卫星组”或“路由域”,减少单个“组”或“域”的卫星节点数量,从而降低管控的复杂度,同时减少单颗卫星所需维护的路由表规模,有效利用星上计算资源,将此类问题统称为卫星网络的分域

问题。分域问题需要解决的问题不仅包括区域的大小、数量如何确定,还要考虑到分域后路由信息如何同步,域内路由、跨域路由如何计算等后续问题。

3.1 基于多层卫星网络架构的分组管理方法

自卫星通信技术发展以来,许多组网中都提到了分层网络架构,并证明了其相对于扁平结构的优势。随着空间技术的发展,不同轨道高度的在轨卫星数量逐渐增多,使得探索基于多层卫星网络架构的分层管控方式成为可能。基于多层卫星网络架构的分层管控方法是通过上层卫星的覆盖区域将下层卫星划分为多个卫星组,每一颗上层卫星对一组下层卫星进行管控的组管理方式,通过局部更新路由表的方式减少路由更新和管控复杂度,如图 4 所示。

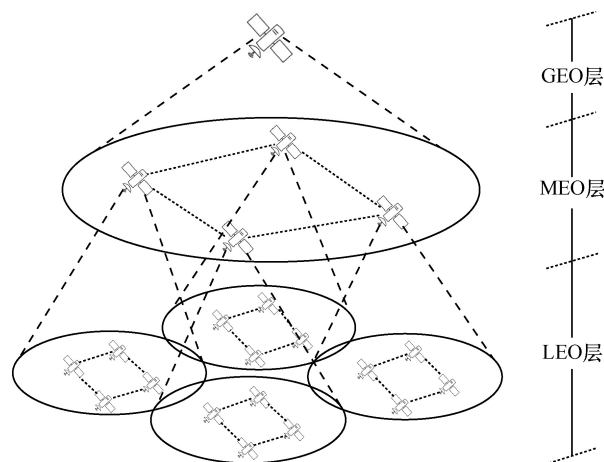


图4 基于多层卫星网络架构的分组管理

卫星网络分层管控的首次提出是在参考文献[31]中,其中提出了多层卫星(Satellite over Satellite, SoS)的概念,指出传统的卫星通信网络往往具有扁平的结构,缺乏灵活性和可扩展性。为了解决上述问题,作者提出了一种新的层级架构,通过利用静地轨道卫星或中轨卫星与低轨卫星构建多层卫星网络架构。在 SoS 网络的基础上,设计动态卫星路由协议(Hierarchical Satellite Routing Protocol, HSRP)。HSRP 是一种基于卫星逻辑位置的链路状态路由算法,由上层卫星充当管理节点,下层卫星将分布式泛洪收集到的链路状态信息汇总至上层卫星,上层卫星之间同步不同卫星组间的链路状态信息,上层卫星按同步完成后的链路状态信息进行下层卫星的点到点路由表计算,并将计算后的路由表下发至下层卫星,减少了低层卫星的计算压力。由于该算法仅依靠最小跳数作为最短路径计算指标,无法保障传输时延要求。

基于上述分层网络架构,参考文献[32]提出了一种3层卫星网络架构(LEO/MEO/GEO),MEO卫星负责下层

LEO 卫星组的链路信息收集, 视为管理层; GEO 卫星根据管理层收集的链路信息进行路由表的计算与下发, 视为控制层; LEO 卫星根据路由表进行数据包转发, 视为数据层。针对 MEO 和 LEO 卫星的移动性, 采用逻辑位置方法将 LEO 卫星的移动性与上层卫星隔离, 以减少 LEO 卫星组的变动。该方法将 LEO 卫星划分为网格点, 最靠近网格逻辑中心的 LEO 卫星被分配到该逻辑位置, 当逻辑位置发生变化时, 后继卫星需从前序卫星处获取路由信息。与基于逻辑位置的路由算法不同, 此处的逻辑位置用于形成卫星组。参考文献[33]提出了一种卫星分组和路由协议 (Satellite Grouping and Routing Protocol, SGRP), SGRP 被应用到由 LEO 层和 MEO 层构建的双层卫星网络中, 根据 MEO 卫星的覆盖范围对 LEO 卫星进行分组。

在划分卫星组的基础上, 设计基于链路传输时延的最短路径算法, 为减少需要同步的链路状态信息, 降低网络开销, 提高计算效率, 设计链路状态信息摘要的同步信息格式。本文在分层管控架构的基础上, 在路由算法上进一步考量了传输时延、网络管控开销等指标。

后续诸多工作在卫星分组管理的基础上, 针对路由计算, 设计基于多约束的多目标优化分布式 QoS 路由算法^[34-40]。此类按照高层卫星覆盖域划分卫星组的管理方式具有一定的局限性, 低层卫星的高度动态性会导致卫星组的频繁变化, 无法保障集群的稳定性和可靠性。

3.2 基于 SDN 多层控制器部署的分层管控方法

利用 SDN 架构进行星地融合组网, 提高了卫星网络的可扩展性和灵活性。对于大规模卫星网络, 若在单卫星轨道层部署控制节点, 受限于卫星的单点能力, 需要部署多个星上控制器; 若在地面部署单控制器节点, 则无法支撑整个网络的移动性管理。因此, 研究基于 SDN 的控制域划分方法以及控制器的部署问题, 通过合理部署多层主从控制节点, 实现大规模卫星网络的高效管控, 具有一定的研究意义。

基于 SDN 架构的管控节点部署问题可归纳为管控节点部署的数量和位置, 参考文献[41]首次提出了 SDN 中的控制器放置问题 (Controller Placement Problem, CPP), 以降低网络时延为优化指标, 研究针对地面广域网拓扑下的最优控制器数量以及放置位置。在此基础上, 基于 CPP 问题, 众多研究者将传输时延^[42]、网络可靠性^[43]、部署成本^[44]等性能作为优化指标。

由于卫星网络的高度动态性和卫星节点资源受限等特点, 现有的控制器动态放置问题 (Dynamic Controller Placement Problem, DCP) 可分为单层控制器部署方案和

多层控制器部署方案。

对于 LEO 单层卫星网络, 参考文献[45]研究了基于地面用户流量需求的 LEO 卫星控制器动态部署问题, 其中流量需求根据用户地理位置和时区进行建模, 将控制器动态放置问题转换为整数线性规划问题, 以平均流建立时间为优化目标, 求解最佳控制器配置方案。基于控制器动态部署, 参考文献[46]以控制器配置开销和迁移成本为优化指标, 求解最佳控制器部署以及控制域大小, 从而进一步减少平均流建立时间。单层 LEO 网络控制器部署方案如图 5 所示。

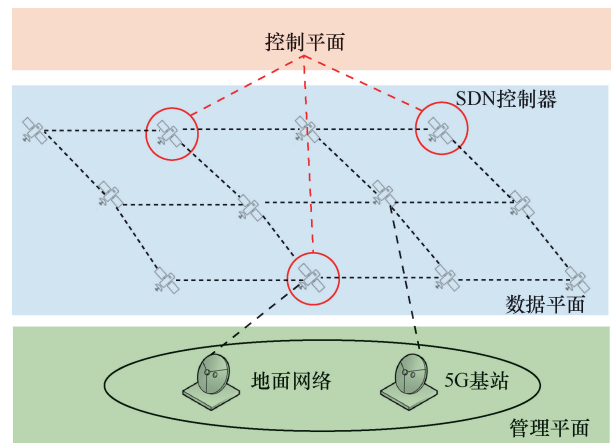


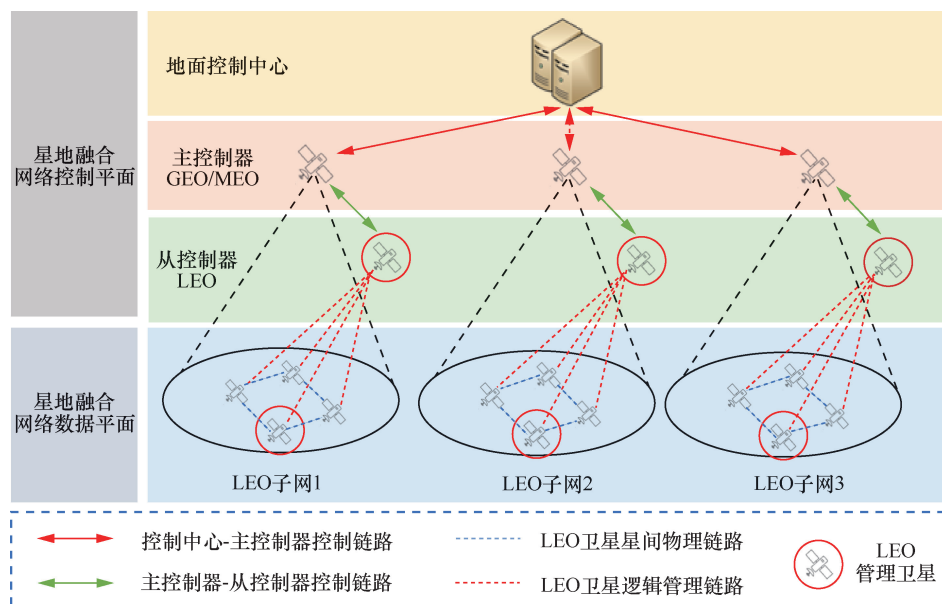
图 5 单层 LEO 网络控制器部署方案

多层控制器部署方案可充分利用多层卫星, 提高网络的可扩展性, 多数采用在多个卫星轨道面上设计主从控制器部署方案。多层控制器部署方案的优势: 利用 GEO 卫星对地全覆盖的优势, LEO 卫星的对地时延优势, 减少卫星与地面间的频繁通信, 提高网络管控的鲁棒性。

多层主从控制器的典型部署架构如图 6 所示, 将 LEO 卫星划分为多个子网, 在地面部署控制中心进行全局视图管控, 在 MEO/GEO 卫星部署主控制器进行各 LEO 子网间的管理, 在 LEO 动态部署从控制器进行 LEO 子网内的管理。由于地面控制器及 GEO 卫星的位置相对固定, 多层控制器部署问题的难点在于如何划分 LEO 卫星子网以及动态选择 LEO 卫星作为从控制器。参考文献^[47]提出基于 LEO 轨道面划分的子网划分方法以及从控制器动态选举方法。参考文献^[48]提出基于 LEO/MEO/GEO 3 层轨道的多层控制方案, 构建多目标优化模型, 设计基于自适应粒子群的启发式算法进行求解。

3.3 基于聚类算法的管理域划分方法

现阶段基于聚类算法的管理域划分方法研究场景多为移动自组织网络 (Mobile Ad-hoc Network, MANET)



场景、车辆自组网 (Vehicular Ad-hoc Network, VANET) 以及无人机网络 (Unmanned Aerial Vehicle Network, UAVNET), 通过分簇算法将网络节点划分为稳定可靠的集群, 以此延长自组网的使用寿命。最早关于 MANET 的分簇方案是参考文献[49]提出的基于节点 ID 的聚类算法, 如图 7 所示, 将网络中的节点进行层次化划分, 使部分相邻的节点形成一个集群, 在每个集群内动态选举一个簇首 (Cluster Head, CH), 集群内除簇首外的节点为簇成员 (Cluster Member, CM), CH 负责收集汇总集群中 CM 的数据并传送至基站或汇聚节点, 上层网络由簇首组成, 通过簇首间交互信息实现集群间通信。参考文献[50]提出了基于网格结构的分簇算法, 根据覆盖面积计算网格大小, 并根据网格间距离进行簇首选举, 提出了多优化簇首选举方法, 形成稳定均衡的聚类。参考文献[51]总结了近年来针对 MANET 的分簇算法以及簇首选举方法。

作为 MANET 的一个分支, VANET 具有不同的移动性和信道条件,更多度量被添加到移动性模型中,如参考文献[52]中的节点度参考文献[53]中的接收信号强度,参考文献[54]中的链路到期时间。无人机网络作为 MANET 的一个分支,也依赖于强大的无人机集群来提供高质量的服务。在参考文献[55]中,考虑链路可用性和边界的影响来计算稳定的无人机网络分区。在移动性预测聚类算法^[56]中,采用运动稳定性和链路存在概率作为聚类标准。

基于聚类算法的管理域划分方法逐步应用于卫星场景。参考文献[57]提出针对小规模卫星网络的分簇方法,通过设置令牌和权重函数进行簇首的选举,但是并未考虑卫星的移动性模型。参考文献[58]针对小型卫星网络提出了聚类算法,在簇首选择过程中,通过对剩余能量和连接度等实时状态进行加权,优化了能量利用率和簇内连通性。参考文献[59]面向有规则布局的星座提出了基于约束条件的分布式算法,充分利用同轨链路能长期稳定的特点,选定同轨节点作为核心簇成员。参考文献[60]针对中继卫星集群网络的联合数据下载和资源管理问题,设计了基于能耗最小化和丢包率最小化的优化问题,采用匹配博弈论模型进行求解。

参考文献:

- [1] IMT-2030 推进组. IMT-2030 (6G) 推进组正式发布《6G 总体愿景与潜在关键技术》白皮书[EB]. 2021.
- IMT-2030 Promotion Group. IMT-2030 (6G) promotion group of-

- ficially releases white paper on "6G overall vision and potential key technologies"[EB]. 2021.
- [2] 李贺武, 吴茜, 徐恪, 等. 天地一体化网络研究进展与趋势[J]. 科技导报, 2016, 34(14): 95-106.
LI H W, WU Q, XU K, et al. Progress and tendency of space and earth integrated network[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(14): 95-106.
 - [3] WHALEN D J. The rise and fall of COMSAT: technology, business, and government in satellite communications[M]. Hampshire: Palgrave Macmillan, 2014.
 - [4] WHALEN D J. The origins of satellite communications 1945-1965[C]//Proceedings of 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston: AIAA, 2003: 661.
 - [5] PR Newswire. Iridium completes historic satellite launch campaign[EB]. 2019.
 - [6] DE SELDING, P B. Globalstar's 2nd-generation system slated to begin launching this fall[EB]. 2010.
 - [7] ROCHELLE P. ORBCOMM. announces commercial service for its final 11 OG2 satellites[EB]. 2016.
 - [8] CURZI G, MODENINI D, TORTORA P. Large constellations of small satellites: a survey of near future challenges and missions[J]. Aerospace, 2020, 7(9): 133.
 - [9] ZONG P, KOHANI S. Design of LEO constellations with inter-satellite connects based on the performance evaluation of the three constellations SpaceX, OneWeb and Telesat[J]. Korea Journal of Remote Sensing, 2021, 37(1): 23-40.
 - [10] 张嘉毅. 美国 SpaceX 公司发射第 94 批 22 颗微版“星链”v2.0 卫星[EB]. 2023.
ZHANG J Y. SpaceX launched the 94th batch of 22 micro-version Starlink v2.0 satellites[EB]. 2023.
 - [11] 何善宝. 卫星互联网: 让全球处处有信号[EB]. 2023.
HE S B. Satellite Internet: making the world available[EB]. 2023.
 - [12] FOUST J. OneWeb slashes size of future satellite constellation[EB]. 2021.
 - [13] RAINBOW J. Telesat to order 100 fewer satellites for LEO constellation[EB]. 2022.
 - [14] 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.
 - [15] 杨丹, 刘江, 张然, 等. 基于 SDN 的卫星通信网络: 现状、机遇与挑战[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 34-41.
YANG D, LIU J, ZHANG R, et al. SDN-based satellite networks: progress, opportunities and challenges[J]. space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 34-41.
 - [16] 张寒, 黄祥岳, 孟祥君, 等. 基于 SDN/NFV 的天地一体化网络架构研究[J]. 军事通信技术, 2017, 38(2): 33-38.
ZHANG H, HUANG X Y, MENG X J, et al. Research on space-ground integrated network architecture based on SDN/NFV[J]. Military Communication Technology, 2017, 38(2): 33-38.
 - [17] AHMED T, DUBOIS E, DUPÉ J B, et al. Software-defined satellite cloud RAN[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2018, 36(1): 108-133.
 - [18] 徐媚琳, 贾敏, 郭庆. 基于 SDN/NFV 的卫星互联网服务功能资源分配研究[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(1): 44-49.
XU M L, JIA M, GUO Q. Research on resource allocation of satellite Internet service function based on SDN/NFV[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(1): 44-49.
 - [19] 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.
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.
 - [20] BAO J Z, ZHAO B K, YU W R, et al. OpenSAN: a software-defined satellite network architecture[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(4): 347-348.
 - [21] LI T X, ZHOU H C, LUO H B, et al. SERVICE: a software defined framework for integrated space-terrestrial satellite communication[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 17(3): 703-716.
 - [22] 王宁远, 陈东, 刘亮, 等. 未来低轨信息网络发展与架构展望[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(2): 396-406.
WANG N Y, CHEN D, LIU L, et al. Development trend and architecture prospect of future low-earth-orbit information networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(2): 396-406.
 - [23] CHEN S Z, SUN S H, KANG S L. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G[J]. China Communications, 2020, 17(12): 156-171.
 - [24] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): TR 38.821[S]. 2019.
 - [25] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks (NTN): TR 38.811[S]. 2020.
 - [26] BURLEIGH S, FALL K, BIRrane E. Bundle protocol version 7: RFC 9171[S]. 2022.
 - [27] WANG H Z, WANG H Q, TAN J, et al. A delay tolerant network routing policy based on optimized control information generation method[J]. IEEE Access, 2018, 6: 51791-51803.
 - [28] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C S. Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks[C]//Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. New York: ACM, 2005: 252-259.
 - [29] ZHANG L X, AFANASYEV A, BURKE J, et al. Named data networking[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(3): 66-73.
 - [30] KARIM F A, AMAN A H M, HASSAN R, et al. Named data net-

- working: a survey on routing strategies[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 90254-90270.
- [31] LEE J W, LEE J W, KIM T W, et al. Satellite over satellite (SOS) network: a novel concept of hierarchical architecture and routing in satellite network[C]//*Proceedings of Proceedings 25th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*. Piscataway: IEEE Press, 2002: 392-399.
- [32] AKYILDIZ I F, EKICI E, BENDER M D. MLSP: a novel routing algorithm for multilayered satellite IP networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2002, 10(3): 411-424.
- [33] CHEN C, EKICI E. A routing protocol for hierarchical LEO/MEO satellite IP networks[J]. *Wireless Networks*, 2005, 11(4): 507-521.
- [34] ZHOU Y H, SUN F C, ZHANG B. A hierarchical and distributed QoS routing protocol for two-layered satellite networks[C]//*The Proceedings of the Multiconference on "Computational Engineering in Systems Applications"*. Piscataway: IEEE Press, 2007: 739-745.
- [35] ZHOU Y H, SUN F C, ZHANG B. A novel QoS routing protocol for LEO and MEO satellite networks[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2007, 25(6): 603-617.
- [36] YIN Z Z, ZHANG L, ZHOU X W. On-demand QoS multicast routing for triple-layered LEO/HEO/GEO satellite IP networks[J]. *Journal of Communications*, 2011, 6(6): 495-508.
- [37] LONG F, YANG Z A, SUN F C, et al. A multi-objective optimization based QoS routing algorithm for multi-layered satellite IP networks[C]//*Proceedings of 2010 International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*. Piscataway: IEEE Press, 2010: 147-152.
- [38] LONG F, SUN F C, YANG Z A. A novel routing algorithm based on multi-objective optimization for satellite networks[J]. *Journal of Networks*, 2011, 6(2): 238.
- [39] LONG F, XIONG N X, VASILAKOS A V, et al. A sustainable heuristic QoS routing algorithm for pervasive multi-layered satellite wireless networks[J]. *Wireless Networks*, 2010, 16(6): 1657-1673.
- [40] ZHOU W, ZHU Y F, LI Y Y, et al. Research on hierarchical architecture and routing of satellite constellation with IGSO-GEO-MEO network[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2020, 38(2): 162-176.
- [41] HELLER B, SHERWOOD R, MCKEOWN N. The controller placement problem[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2012, 42(4): 473-478.
- [42] WANG G D, ZHAO Y X, HUANG J, et al. An effective approach to controller placement in software defined wide area networks[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2018, 15(1): 344-355.
- [43] MOAZZENI S, KHAYYAMBASHI M R, MOVAHHEDINIA N, et al. On reliability improvement of software-defined networks[J]. *Computer Networks*, 2018, 133: 195-211.
- [44] KHORRAMIZADEH M, AHMADI V. Capacity and load-aware software-defined network controller placement in heterogeneous environments[J]. *Computer Communications*, 2018, 129: 226-247.
- [45] PAPA A, DE COLA T, VIZARRETA P, et al. Dynamic SDN controller placement in a LEO constellation satellite network[C]//*Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 206-212.
- [46] PAPA A, DE COLA T, VIZARRETA P, et al. Design and evaluation of reconfigurable SDN LEO constellations[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2020, 17(3): 1432-1445.
- [47] XU S, WANG X W, GAO B Y, et al. Controller placement in software-defined satellite networks[C]//*Proceedings of 2018 14th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks (MSN)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 146-151.
- [48] WU S, CHEN X Q, YANG L, et al. Dynamic and static controller placement in software-defined satellite networking[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 152: 49-58.
- [49] GERLA M, TSAI T C. Multicenter, mobile, multimedia radio network[J]. *Wireless Networks*, 1995, 1(3): 255-265.
- [50] LALITHA K, THANGARAJAN R, UDGATA S K, et al. GCCR: an efficient grid based clustering and combinational routing in wireless sensor networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 97(1): 1075-1095.
- [51] AHMAD M, HAMEED A, IKRAM A A, et al. State-of-the-art clustering schemes in mobile ad hoc networks: objectives, challenges, and future directions[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 17067-17081.
- [52] KWON J H, KWON C, KIM E J. Neighbor mobility-based clustering scheme for vehicular ad hoc networks[C]//*Proceedings of 2015 International Conference on Platform Technology and Service*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 31-32.
- [53] AHIZOUNE A, HAFID A. A new stability based clustering algorithm (SBCA) for VANETs[C]//*Proceedings of 37th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks - Workshops*. Piscataway: IEEE Press, 2013: 843-847.
- [54] ZHANG L R, ELSAYEDA H. A novel cluster-based protocol for topology discovery in vehicular ad hoc network[J]. *Procedia Computer Science*, 2012, 10: 525-534.
- [55] YU Y L, RU L, FANG K. Bio-inspired mobility prediction clustering algorithm for ad hoc UAV networks[J]. *Engineering Letters*, 2016, 24(1): 328-337.
- [56] XING N, ZONG Q, DOU L Q, et al. A game theoretic approach for mobility prediction clustering in unmanned aerial vehicle networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(10): 9963-9973.
- [57] JIANG Y Q, LIU Y B, WEN Y Y, et al. A clustering algorithm applied to the satellite networks management[C]//*Proceedings of the Fourth International Conference on Parallel and Distributed*

Computing, Applications and Technologies. Piscataway: IEEE Press, 2003: 396-399.

- [58] QIN J, MAO X, MCNAIR J. Weight based dominating set clustering algorithm for small satellite networks[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2012: 3195-3199.

- [59] 江玉洁, 姜兴龙, 梁旭文. 面向移动通信星座网络的自主管理分簇算法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(S2): 203-208.

JIANG Y J, JIANG X L, LIANG X W. A clustering algorithm for self-management in mobile satellite constellation network[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(S2): 203-208.

- [60] ZHANG S H, CUI G F, WANG W D. Joint data downloading and resource management for small satellite cluster networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(1): 887-901.

[作者简介]



廖新悦 (1998—), 女, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室博士生, 主要研究方向为软件定义网络、卫星网络。



黄正璇 (2001—), 男, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室硕士生, 主要研究方向为软件定义网络、卫星网络。



刘江 (1983—), 男, 北京邮电大学教授, 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。



唐琴琴 (1994—), 女, 北京邮电大学博士后, 主要研究方向为移动边缘计算、云网融合与算力网络、卫星网络、网络人工智能等。



张然 (1993—), 男, 北京邮电大学博士后, 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。



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。