

文章编号:1007-5321(2021)06-0001-12

DOI:10.13190/j.jbupt.2021-113

星地融合智能组网:愿景与关键技术

刘 杨, 彭木根

(1. 北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876; 2. 北京邮电大学 网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 星地融合网络不但可以满足无人自动驾驶、物联网、大连接等新兴服务的需求,而且在灾害预防等公共安全方面也有广泛的应用场景. 从星地融合网络如何高效率、低时延地服务地面应用的愿景出发,结合软件定义网络和网络功能虚拟化技术,提出了星地融合智能组网的关键技术,如组网架构、数据感知、接入控制、多维网络切片、时敏性路由转发等,阐述了这些关键技术的原理和性能,探讨了星地融合智能组网现存的挑战和未来发展方向.

关键词: 星地; 组网; 感知; 接入控制; 切片

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A

Satellite-Ground Fusion Intelligent Networking: Vision and Key Technologies

LIU Yang, PENG Mu-gen

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
2. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The satellite-ground fusion networks can not only meet the demands of emerging services such as auto-driving and large connections, but also be widely used in the disaster alarming and public safety applications. To serve ground applications with high efficiency and low delay for satellite ground fusion network, the key technologies of satellite-ground fusion intelligent networking are proposed. The technologies including networking architecture, data perception, access control, multi-dimensional network slicing, and time-sensitive routing and forwarding are then expounded in terms of principle and performance. Finally, the existing challenges and future directions are discussed.

Key words: satellite-ground; networking; sensing; access control; slice

随着地面互联网技术的快速发展和航天任务复杂性的不断提高,互联网扩展到外太空,建立星地融合组网的需求日益迫切,人类也可利用星地融合一体化网络进入、认识、利用空间. 因此,星地融合一体化网络将是我国信息化领域的重要基础设施^[1]. 星地融合组网架构主要由天基和地基两类网络组成. 天基网络由骨干网和接入网组成,骨干网由地球同步轨道卫星构成,接入网由布设在低轨和临近

空间的若干天基接入卫星节点^[2]和航空自组网、高空平台等构成. 地基网络包括传统蜂窝网络、地面互联网、移动自组网、卫星地面站等. 星地融合组网以地基网络为基础,并利用天基网络的覆盖范围广等优势,通过融合各类异构网络来实现星地网络的无缝覆盖.

软件定义网络(SDN, software defined network)、网络功能虚拟化(NFV, network function vir-

收稿日期: 2021-06-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61972049)

作者简介: 刘 杨(1984—), 男, 副教授.

通信作者: 彭木根(1978—), 男, 教授, E-mail: pmg@bupt.edu.cn.

tualization)等新技术的出现,推动了网络架构和网元动态部署的发展. SDN 架构采用分层 Open-Flow 架构体系协议,其基本思想是将传统网络的控制平面和数据平面分离开. 基于 SDN/NFV 的星地融合网络实现了网络数据平面和控制平面的分离,并且通过提供外部接口允许网络服务的动态部署、迁移和升级,实现分布式和集中式的网络控制架构. 此外,基于 SDN/NFV 的星地融合组网能够实现路由协议的快速部署和多维网络切片,为用户提供更加智能的网络资源分配服务. 目前相关学者针对基于 SDN/NFV 的星地融合组网提出了一些方案,但仍处于研究的起步阶段,部署难度较大. 笔者首先阐述了星地融合组网的发展现状,提出了基于 SDN/NFV 星地融合智能组网的愿景,介绍了星地融合智能组网的关键技术,并讨论了星地融合智能组网面临的挑战和未来发展方向,为后续研究提供参考.

1 研究现状

互联网的快速发展使用户数量激增,在人烟稀少的荒漠、戈壁、丛林和海洋也存在用户接入互联网的需求,但受通信容量和覆盖范围的影响,为上述恶劣环境提供可靠、高速、安全的无线网络接入服务较为困难. 因此,急需一种能满足广覆盖和高容量需求的网络架构,实现空、天、地、海的通信全覆盖. 国家高技术研究发展计划中指出,要将我国的未来网络建设成为星地互联互通的一体化网络. 在我国“十三五”规划中,将天地一体化信息网络纳入了科技创新 2030 重大项目.

黄韬等^[3]提出了星地融合组网,以地基网络为基础,以天基网络为延伸,承载空、天、地、海各类网络业务,实现空、天、地、海全覆盖,以保障用户的各类需求. 目前,对星地融合组网的研究主要侧重于卫星到地面网络,如美国将发射大量低成本的低轨卫星,而在 Google Loon 项目计划中将气球漂浮在平流层,为地基网络提供无线信号覆盖,目前已经进入商业化阶段. 欧洲联盟则是侧重研究卫星到地面网络与第 5 代移动通信系统(5G, the fifth generation of mobile communications system)的融合,欧洲联盟的 H2020 计划给出了多个网络融合架构系统原型. 2020 年 4 月 20 日,5G 和卫星互联网建设首次被国家发展改革委员会纳入“新基建”范畴,未来两者的融合将成为国家战略性工程,从而实现星地融合智

能组网的搭建.

星地融合智能组网主要包括天基和地基网络,这 2 部分可以独立地通信或通过天基接入网跨域进行互连,相互补充,形成一个能覆盖全球的大容量网络^[4].

天基网络由轨道卫星、飞机、热气球组成. 轨道卫星可分为同步卫星、中轨卫星、低轨卫星 3 类. 卫星间的激光通信采用 Ka 或 Ku 频带,可提供高带宽、高速的通信服务. 目前,卫星通信技术已相对成熟. 例如,中国的北斗卫星系统和美国的铱星系统都取得了巨大的成就. 同步卫星主要构成天基骨干网,其他卫星与飞机、热气球等组成天基接入网. 其中,飞机、热气球等组成的移动网络能提高机会性的数据传输.

地基网络主要由蜂窝网络、地面互联网、移动自组网等组成. 与天基网络相比,地面网络的拓扑结构相对固定,虽然手机或车辆是可移动的,但通信链路却是相对稳定的. 然而,地基网络的覆盖范围有限,难以覆盖极地、偏远的山区^[4]. 星地融合智能组网的子网参数如表 1 所示.

星地融合网络为日益增长的用户提供了网络无缝覆盖服务,天基网络与地基网络的共存虽然能发挥其各自的优势,但也会带来网络之间的严重干扰. 为了实现更合理的资源分配,Zhu 等^[5]基于云的综合星地网络中的协同传输和资源分配,提出了一个基于两层博弈的资源分配问题来最大化运营商的效用,以得到定价策略下的用户选择;然后,基于用户的服务解决能量最小化的问题,在满足服务质量约束的情况下,在用户之间分配功率和计算资源.

Zhang 等^[6]研究了多播波束形成的星地协作系统,以优化通信容量和服务质量. 首先根据用户需要的内容协同设计地面和卫星的波束形成向量. 同时,考虑到内容提供中心与卫星和基站之间的回程链路有限,用户总是需要高质量的服务,提出一种联合优化迭代算法来协同设计卫星和基站的波束形成向量.

为了实现星地融合网络中的最大化网络容量并保证大量用户的服务质量,Deng 等^[7]提出了由多组预编码和资源分配联合优化方案. 该方案在系统容量和服务质量方面优于现有算法,能够显著提高星地融合网络的性能.

为了实现天基网络和地基网络的进一步融合,

表 1 星地融合智能组网的子网参数

网络名		媒介	带宽/GHz	速率/(Gbit·s ⁻¹)	距离/km	网络
天基骨干网	高轨道卫星	Ka 频带	20.000 ~ 30.000	1 ~ 10.000 0	36 000	卫星之间使用激光进行通信. 卫星使用
	中轨卫星	Ku 频带	10.000 ~ 20.000	<1.200 0	10 000 ~ 20 000	C, Ku, Ka, UHF, L, S, X 和其他频段的激光
天基接入网	近地卫星	Ku 频带	10.000 ~ 20.000	<3.750 0	<1 500	与天基接入网和地面网络进行通信
	航空自组网	C 频带	0.020	-	<10	网络内部互联, 与地面网络连接. 主要用于射频通信
	高空平台	无线电频带	0.500	<10.000 0	>1 700	
		第 1 代无线通信系统	0.050	0.000 3	<50	
地基网络		第 2 代无线通信系统	0.050	0.000 8	<50	
	蜂窝网	第 3 代无线通信系统	0.145	0.015 0	50	移动网络与地面网络之间通过无线或有
		第 4 代无线通信系统	0.140	>0.020 0	100	线进行通信
		第 5 代无线通信系统	1.000	10.000 0	50 ~ 100	
	无线局域网	射频	2.400	0.005 0 ~ 0.010 0	<50	

将 SDN 和 NFV 技术应用于星地融合组网. 为了满足服务的动态部署和网络结构的弹性适变, 需要通过 SDN/NFV 将网络资源虚拟化, 利用业务的智能感知来分配网络资源, 这涉及细粒度的网络资源态势感知、智能接入控制和多维网络切片等关键技术.

利用 SDN 技术将数据平面虚拟化, 并将控制器的功能集群化, 从而使数据平面和控制平面分离, 实现数据传输的动态分配. 但对于星地融合网络, 卫星入轨后天基网络的底层物理资源难以更新, 传统数据平面难以适应地面服务的灵活性, 传统控制平面的控制器也难以同时处理星地融合网络高动态、大跨度的路径配置计算. 因此, 侯筠仪等^[8]提出在 SDN 的基础上引入 NFV 技术, 对控制平面和数据平面进行功能上的二次虚拟化与切分, 进而提升星地融合网络的传输效率. Papa 等^[9]提出了一种低轨卫星星座网络中的动态 SDN 控制器部署方法, 以适应网络流量随用户地理位置和时区变化而产生的动态变化.

在移动回程链路中引入卫星通信可以增加其可用性和弹性, Mendoza 等^[10]提出了在 5G 卫星集成网络场景下基于 SDN 的流量分配策略, 在地基网络链路故障和非故障的情况下最大化利用网络的能效. Vilalta 等^[11]提出了一种用于 5G 服务分发的 SDN/NFV 编排架构, 并且通过虚拟化的编排程序证明了对使用异构网络相互连接的服务和应用程序进行编排的重要性.

李晶林等^[12]提出了一种基于 SDN 的星地融合组网的端侧计算方案. 基于端侧计算的 SDN 空地

组网, 充分利用了边缘设备的缓存和计算能力, 提高了信息传输的可靠性, 缓解了天基 SDN 的控制平面的计算开销和负担.

Du 等^[13]提出了一种基于 SDN 的频谱共享和流量卸载机制, 以实现蜂窝网络地面基站和星地通信系统波束群之间的协作和竞争, 同时也揭示了移动网络运营商存在唯一能够实现最大期望效用的最优卸载阈值.

网络切片技术是实现星地融合智能组网的关键技术, 可根据不同的用户业务需求定制专属网络功能, 满足不同的服务质量 (QoS, quality of service) 需求, 提高星地融合智能组网的可扩展性和灵活性. 目前的网络切片技术主要包括基于卫星地面段的虚拟化、虚拟网络嵌入、业务功能链等. 卫星地面段虚拟化主要是对网关、卫星的控制跟踪中心等进行虚拟化; 虚拟网络嵌入主要是将虚拟节点映射到物理节点; 业务功能链是根据用户业务需求, 将虚拟的网络功能进行组链, 是一个能够满足业务需求的完整功能集合.

Ma 等^[14]提出了一种基于 SDN/NFV 的 5G 核心网络架构, 通过结合 SDN, NFV 和边缘计算等技术, 提供网络功能的分布式按需部署、服务保证的网络切片、网络功能的灵活编排和最优化的网络负载分配. Ahmed 等^[15]基于 SDN/NFV 提出了按需分配的卫星网络切片架构, 以实现天基网络的服务, 从具有连通性的网络模型转移到具有高度定制性和适应性的服务型网络模型. 此外, 在多样化的服务需求下通过对天基网络资源的优化编排实现灵活的服务链选择和供应, 在满足服务要求的前提下将天基资

源消耗降至最低。

Ageyev 等^[16]分析了 SDN、NFV 架构下网络存在的安全问题,发现安全漏洞大多数存在于数据层和控制层,主要为数据泄露、数据篡改、未授权接入等。此外,因为网络功能被虚拟化,所以为安全功能定义标准接口是目前最困难的工作。

Du 等^[17]分析了在现有地面网络下如何利用物理层的安全技术实现地面网络和卫星网络安全通信的问题。给出了使用卫星自适应波束赋形和人工噪声实现安全通信的方法。Zhu 等^[18]研究了地面卫星集成网络中的下行协作多组多播传输的问题,综合地面卫星网络规模较大的情况,提出了一种时分协作多组多播方案,通过迭代算法解决了加权最大最小公平波束赋形的设计问题。Zhu 等^[19]研究了基于非正交多址接入的集成地面卫星网络的下行传输,提出了一种基于信道质量的卫星用户选择方案,最大限度地提高了非正交多址接入组用户之间的最小信道相关性。Kuang 等^[20]介绍了在未来地面-卫星通信网络无线电资源管理中的频谱资源管理、光束资源管理和跨层电源管理这 3 个主要技术挑战。

2 星地融合智能组网愿景

在业务需求和技术发展的双重驱动下,卫星通信将与地面通信一体化发展,从业务、系统等不同层次进行融合,构建天地一体化通信系统,从而实现全球通信网络无缝立体覆盖。基于 SDN/NFV 的星地融合的智能组网愿景如图 1 所示。星地融合网络主要包括天基网络和地基网络。其中天基网络又包括天基骨干网和天基接入网。星地融合智能组网由 2 种网络互联而成,以地基网络为依托,天基网络为拓展^[21]。

星地融合智能组网采用统一的架构和统一的智能管控。NFV 将网络中的计算、通信等物理资源以及网络功能进行虚拟化,实现星地融合网络系统资源统一调度和管控。SDN 将星地融合网络的控制平面和数据平面分开,引入逻辑集中控制,并通过开放接口促进了网络的可编程性和可重构性,实现网络功能可柔性分割和智能重构,可适应星地融合网络卫星载荷资源有限和业务需求动态变化的特点^[22]。

星地融合智能组网的 SDN 控制器可以部署在云端,以使网络行为更加规范,并对虚拟化的网络资

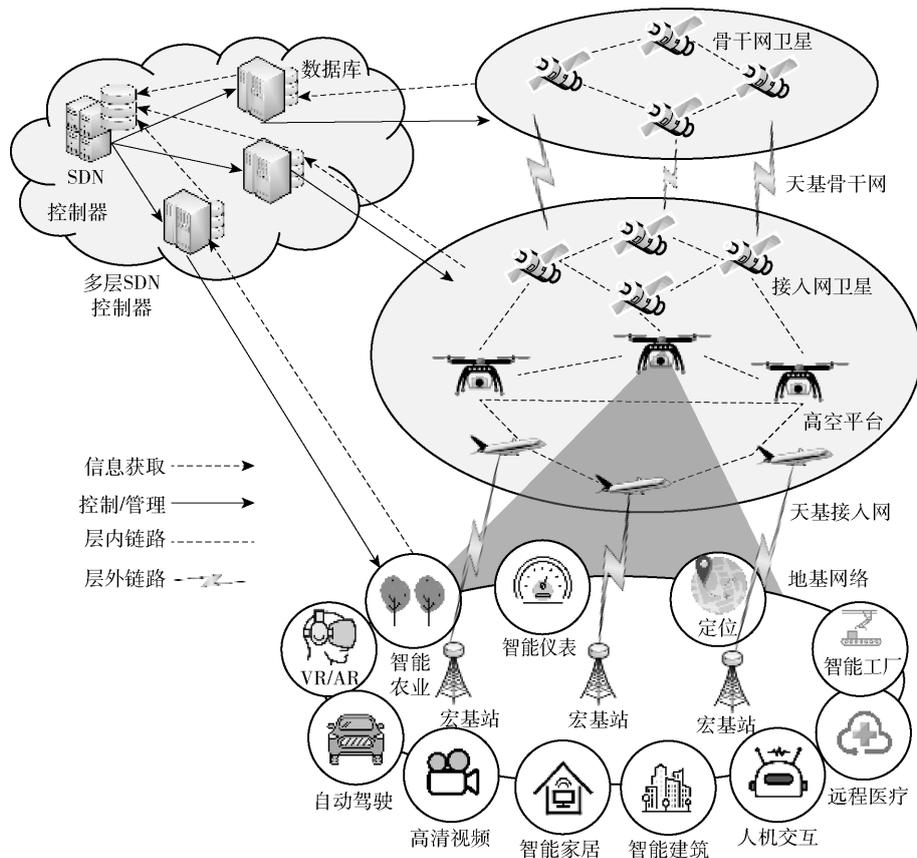


图1 星地融合智能组网愿景

源进行动态管理。考虑到天基骨干网、天基接入网以及地基网络的特点不同,如不同网络的网络设备具有不同的功能,每个网络 SDN 控制器的控制和通信接口应专用于相应的网络。在每个网络的 SDN 控制器上引入更高层的 SDN 控制器,用来协调不同网络的操作,以便更好地为各类业务服务。为了实现网络资源的统一智能管控,需要引入智能感知技术,对业务和网络资源进行感知识别,为路由转发、用户接入控制等做出智能决策,从而实现服务和需求导向的网络控制与优化,以更好地支持星地融合

网络中种类繁多的业务,提高网络的传输能力。

星地融合智能组网具有覆盖范围广、可灵活部署、动态性强和不易受地面灾害影响等特点,可为用户提供统一的业务支持与调度,使用户随时随地无感知地接入网络,获得无缝的通信服务。星地融合智能组网在智能工厂、远程医疗、智能家居、自动驾驶以及智慧农业等多种业务场景中都可以发挥重要作用,满足面向未来的万物智联的需求。

星地融合智能组网主要由基础结构层、控制层和应用层3层组成,如图2所示。

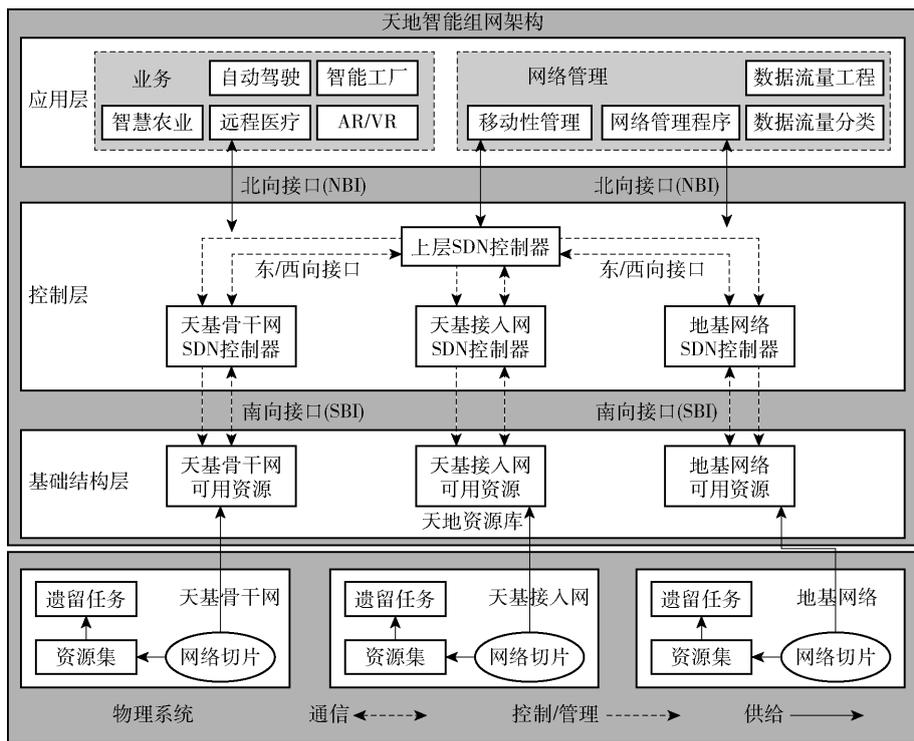


图2 星地融合智能组网架构

基础结构层主要管理组网中的计算、通信、存储等网络资源。由于星地融合网络具有动态性强的特点,该层中的资源池随时间而变化。针对此特性,可以采用资源虚拟化技术将物理资源抽象成逻辑资源,视频流、增强现实技术、自动驾驶等业务可以直接部署在虚拟化资源的集合上。通过动态执行虚拟和物理资源映射,网络切片智能适配,可以减轻各业务之间的干扰,增强组网通信的能力。

在控制层,SDN 控制器以分层方式组织,根据地理位置、服务场景等要求划分不同域中的网络操作,达到多尺度控制的目的。通过南向接口(SBI, southbound interface),SDN 控制器控制各自的底层物理资源。考虑到不同网络的显著异构性,南向接

口将针对每个网络支持基站中的卫星波束控制、无人机运动控制和资源块分配等功能。SDN 控制器的实现还能解决控制范围和粒度的问题,例如 SDN 控制器可以完全或部分控制底层网络组件。为了有效利用异构网络资源,实现不同层次的网络功能,不同网段的 SDN 控制器由上层控制器通过东/西向接口进行协调。

在应用层,基于控制层通过北向接口(NBI, northbound interface)提供的功能,执行各种业务服务和网络管理功能。来自应用程序的请求可以由北向接口翻译成 SDN 控制器的规则,这些规则通过控制器进行感知识别,进一步解释成通过南向接口指导底层设备的指令。业务服务对应于直接提供给各

类业务用户的服务,而网络管理功能有助于高效操作,例如移动性管理、网络管理程序、数据流量分类和数据流量工程. 具体来说,移动性管理旨在通过将各类业务的用户与合适的接入点相关联来为种类繁多的业务提供无缝连接. 数据流量分类将数据流量与不同的业务服务相关联,并通过深度包检测和机器学习将它们按不同的 QoS 类别分类. 基于分类和感知识别可以区分业务类型. 数据流量工程可以将数据流量导向不同的网段和接入点,如低轨卫星和地面基站,以实现负载平衡,或者动态更改路由以避免拥塞. 网络虚拟机管理程序可以动态调度多维资源,在公共物理基础架构上创建共存的多个虚拟网络. 虚拟网络可以被定制,以更好地支持不同的业务服务.

3 关键技术

为了使星地融合智能组网高效率、低时延地服务于地面应用,需要对以下关键技术进行深入研究.

3.1 星地融合智能组网技术

星地融合智能组网的网络体系架构如图3所示. 该体系利用边缘计算和传统云计算,完成数据收集、处理、分析和挖掘,从而在响应用户请求时提高 QoS,同时也能够为不同的应用提供统一的视图,支持基于业务的智能组网,便于动态配置网络环境,提高网络资源的利用率. 笔者根据业务类型,结合机器学习的方法提出了满足网络需求的解决方案;根据当前的网络状态提出了动态调度资源的方案. 该方案能够提供智能和灵活的服务并按需分配资源,以确保高效执行任务. 为便于管理星地融合的大规模网络,可根据应用场景、服务类型、地理位置、应用密度等因素,将网络细粒度地划分成名为“域”的子网,交由边缘计算节点进行控制,同时结合网络资源配置方案,使每个网络域最大限度地满足业务要求,实现负载均衡,以避免资源短缺或浪费. 引入 NFV 和网络协议栈的预处理层,解决星地融合网络中异构设备的通信和兼容问题,有效提高网络的可扩展性.

3.2 天地一体感知、接入控制及多维网络切片技术

星地融合网络对天、地、海的广覆盖优势不仅可以转化为更广阔的数据感知优势,还能转化为未来全面部署的物联网广连接优势. 传统的传感器节点包括监测卫星、无人机、地面感知等,由于传感平台的限制,所以存在检测范围固定、数据获取容量有限

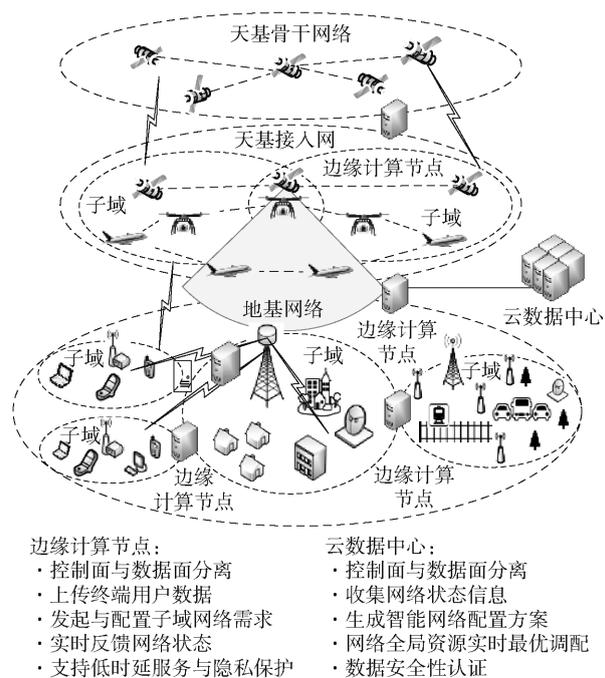


图3 星地融合智能组网的网络体系架构

的缺陷. 星地融合智能组网的基础设施(悬空站、接力卫星等)结构复杂,无线连接类型多样(窄带连接、宽带连接等),卫星间的拓扑连接会随着连接信号的强弱随时变化,传统感知技术很难保证星地融合网络信号的可靠传输,平台的固定与分离也使各类资源的使用效率低^[23]. 因此,可将 SDN, NFV 与星地融合智能组网相结合,构建一种由软件定义的,集感知、传输、计算于一体的星地融合集成结构,如图4所示. 该结构可以分为物理层、控制层和应用层,物理层包括实施感知的检测节点,如监测卫星、无人机等. 这些节点可接收来自控制层的指令,进行数据的检测,并将所有检测到的数据上传至控制层. 控制层接收到这些数据后再传输给应用层中需要数据的应用,如气象预测应用,所有气象预测所需要的数据都会由控制层传到该应用中,然后由应用层进行计算完成应用服务. 这样的结构具有很高的资源利用效率,同时能自由结合多类传感器,实现覆盖广、时间长的数据监测.

随机接入机会性的传输数据包,能够实现星地融合智能组网中用户终端的接入控制^[24]. 为了帮助随机接入的用户设备解决冲突并扩展用户设备的传输范围,将中继器传输与随机接入相结合,采用了中继器辅助接入控制的方法. 中继器辅助接入控制包含用户接入设备、中继器和接入点(基站). 用户设备被中继器包围,并且由于其所处环境,大小和电

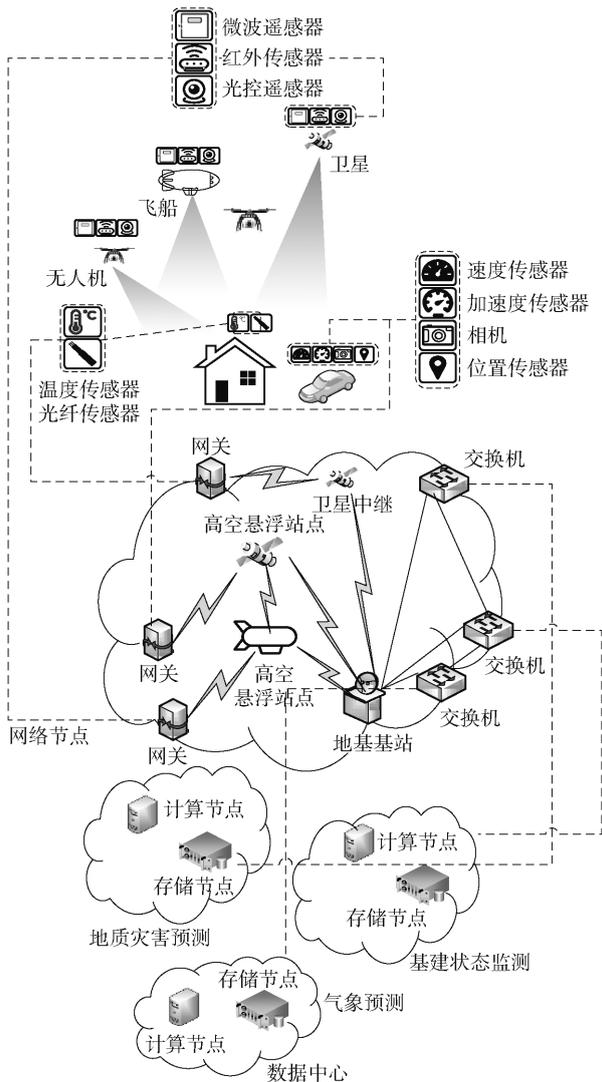


图 4 感传算一体的星地融合集成架构

池的限制,在星地融合网络中的能源有限. 而中继器能够从电池或可再生能源中获得足够的能源且具有数据收集、数据中继器和信号重传的功能,能够帮助用户设备完成数据包的发送. 在接入控制过程中,用户设备将数据包传输给基站和中继器,在用户发送数据包后可能存在 3 种情况: 1) 基站成功将数据包解码并广播确认信号; 2) 由于用户数据包冲突导致基站解码失败,广播错误信号; 3) 数据包丢失,基站不广播任何反馈信号. 当中继器接收到错误信号时,中继器将接收到的数据包顺序地转发到基站. 当中继器未收到反馈信号时,附近的中继器继续将用户数据包发送到基站. 对于数据包的冲突,基站将原始信号和中继器信号进行组合,随后通过多用户检测来对冲突的信号进行解码. 随机接入框架如图 5 所示.

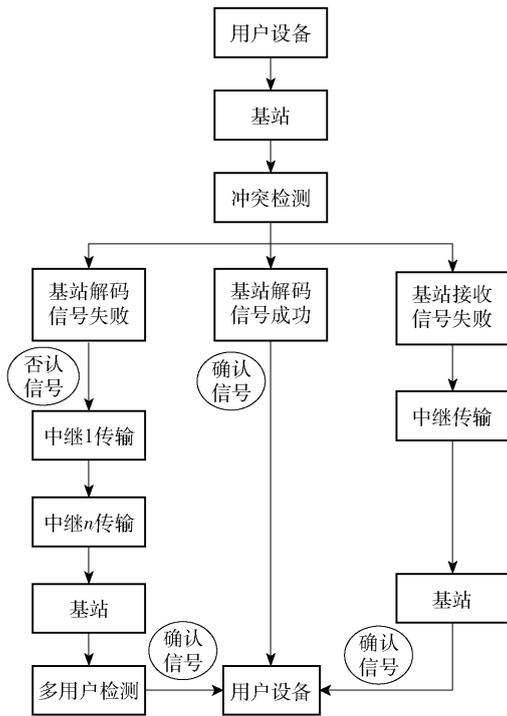


图 5 基于中继器辅助的随机接入框架

多维网络切片构建出的相互独立的虚拟逻辑网络可针对不同网络业务配置不同的资源,能够极大地提高资源的利用效率和网络的灵活性. 将网络切片技术应用在星地融合智能组网上可以为不同的业务定制网络功能,这些网络切片在逻辑上互相独立,不但可以满足用户不同业务的 QoS 需求,同时也能提高网络资源的利用效率和组网的灵活性,如图 6 所示. 对于接收到的用户业务,基于 SDN 的星地融合智能网络可以感知现有可用资源和业务的特点,自动进行有针对性的网络切片匹配,分配相应的资源,克服了天基网络硬件资源相对固定且有限的缺

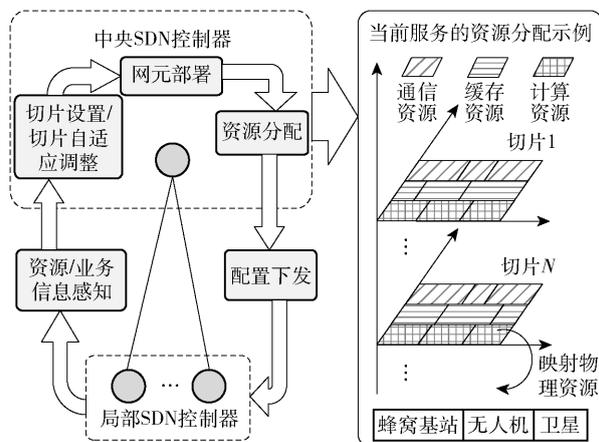


图 6 网络切片在星地融合智能组网中的应用

点,在广覆盖的同时最大限度地提高资源利用率,保证 QoS.

3.3 时敏确定性路由转发

在拓扑结构、节点状态高动态变化且资源受限的星地融合网络环境下,针对静态路由拓扑的传统路由技术已无法满足低时延、高可靠性传输业务的需求. 需要对节点组网结构、路由链路信息进行实时处理,减少节点发现、路由规划、容量分析等引起的延时传输和网络间断现象,从而保证业务完成的连续性与高效性^[25]. 时敏确定性路由技术基于时变连续图、确定性路由算法和路由协议实现高动态场景下的路由状态更新.

时变连续图对节点、链路集合、时间范围、链路带宽、缓存及其占用情况进行统计、描述,将节点信息和路由资源聚合表征,相较于快照图、时间扩展图、时间聚合图等传统时变图模型,可降低存储规模,提升模型刻画效率和精度^[26]. 时变连续图在刻画出组网链路时空模型后,由于链路流量、缓存数量、节点状态具有时变性,需要保证每一个节点的流入与流出数据量守恒,节点总缓存量不超过缓存容量. 时间连续图同时适用于多种业务场景下不同带宽链路的模拟计算.

卫星节点根据多场景业务需求和时变连续图所提供的信息,基于最小开销和高资源利用率的原则,利用确定性路由算法进行时变链路下信源到信宿之间的动态路由选择,保障高质量完成端到端的业务^[19],如图7所示. 卫星节点结合业务场景的起始时刻,设定相应环境参数的初值,记录初始路由状态;根据业务场景所需传输的数据量,选择适合传输的路由链路;根据节点之间的连通关系,记录处于接入状态的节点标号,结合时变连续图中节点出入数据量守恒的原则,统计当前节点下有效的邻接连通链路,找出开销最小的下一跳节点,更新路由列表;根据链路容量和节点缓存容量,合理分配网络资源,最终保障业务完成的时间确定性.

结合所提出的确定性路由算法和网络层协议(IP, Internet protocol)技术对网络层协议进行拓展,在现有IP承载网设备和协议技术的基础上添加自适应拓扑选择机制和基于IP的时敏交换机制,支持时敏路由拓扑建模、链路动态调整及数据包的分发. 针对不同场景实现精准业务交互,支持业务自动化控制管理,依照确定性路由高速传输数据.

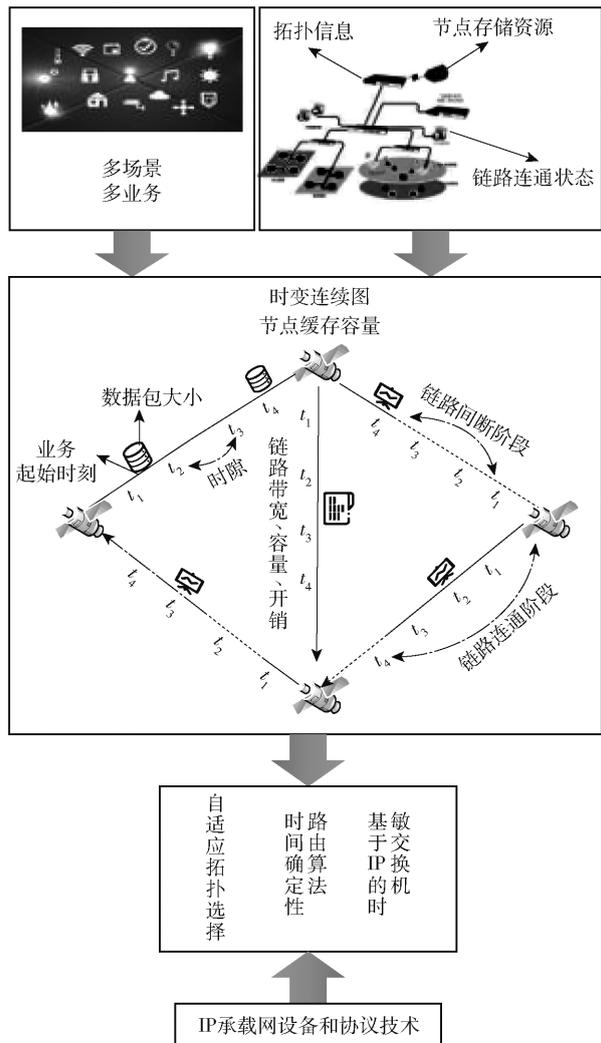


图7 时敏确定性路由转发流程

3.4 星地协同多播传输技术

与传统的消息和语音业务相比,多媒体业务的数据量大,需要更大的传输带宽,增加了无线网络的负担. 因此,高效的内容分发是提高网络性能的一个重要方向^[27].

卫星信号覆盖范围广,非常适合向分布广泛的地面用户提供多播服务. 在多播传输中,每个组的传输速率受到最低速率用户的限制,对于地面信道较差的用户,多播传输的性能会显著降低. 而卫星信道的波动一般比地面信道的波动要小. 因此,在星地融合网络中,卫星网络除了可解决信号无缝覆盖的问题,还能与地面基站协作,提供多播传输.

假设网络中的用户配备有双模终端,可将具有相同兴趣的用户分配到同一组,在多天线的辅助下,基站和卫星通过多播波束协同向不同的用户群发送所需的内容. 在多组多播的情况下,来自基站和卫

星的组之间会有干扰.因此,合理的波束形成设计和资源分配对容量优化至关重要.

星地协同多组多播传输方案通过最大化每个分组中的最小加权接收信噪比来实现波束形成设计和资源分配^[28],如图8所示.但是,在分组规模大的情况下,卫星很难抑制有限天线组之间的干扰,可采用时分多播方案作为替代方案.在时分方案中,基站和卫星向不同的用户群发送所需的内容,用户通过最大比合并的方式合并接收的信号.通过时分和最大比合并,在提高地面信道较差用户的传输速率时,卫星不会对其他用户造成额外的干扰.

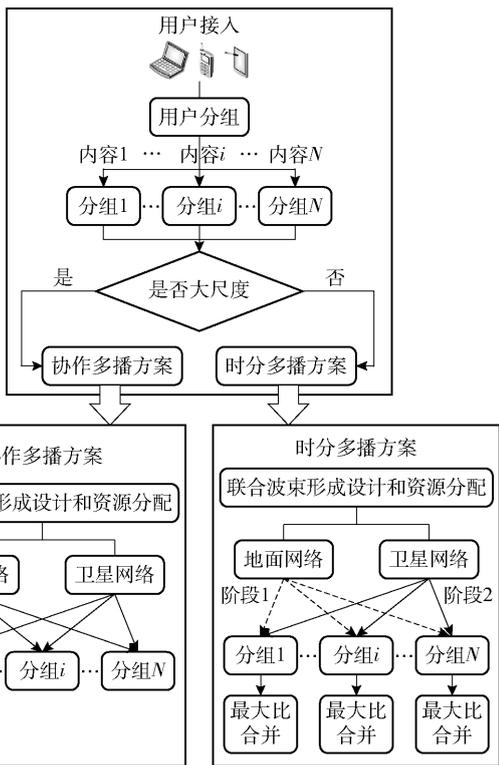


图8 星地协同多组多播传输方案

相比地面多播传输方案,星地协同多播传输方案具有更高的传输速率.卫星可以提高地面信道较差用户的传输速率,多播传输的整体速率也会得到提高.因此,在频谱资源和功率资源有限的情况下,星地协同多播传输能以更高的传输速率向地面用户提供多播服务,或者在延迟一定时间后向更多的用户传送相同的内容.

4 挑战与未来方向

尽管学术界和工业界已经全面展开对星地融合网络的研究,但由于星地融合网络的组网结构复杂,时空尺度大,业务差异大,动态性强,星地融合网络

的设计依然有着较大的研究潜力和应用价值.后续研究可以从以下几方面展开.

4.1 智能组网架构

星地融合网络是任务驱动聚集的弱连接网络,具备网络碎片化、拓扑动态化的特性.因此,部分区域内容易存在无连接功能的天基卫星的情况,此时低轨卫星需要进行独立组网.故需研究星地融合组网方法,实现网络节点在时空动态变化场景下智能、动态、自适应组网,同时应充分考虑方法的可扩展性,以更好地适应未来更加复杂的业务场景.同时,星地融合网络具有的特性,使得移动性管理的复杂程度陡然上升.网络的快速时变特性导致信道估计不准确,设备在异构网络中频繁地切换可带来高额时空开销,用户定位困难,路由优化效率低下.因此,急需提出创新型移动管理解决方案.目前,星地融合网络的融合会催生更加多样化的服务,不同的业务对QoS的要求各不相同.然而星地融合网络中QoS需求与多维资源之间的复杂关系尚未明确,加之星地融合网络的异构性特征,各子网的通信方式、媒介、设备和应用场景均有所不同,故未来还可研究面向业务的统一资源管理和合理资源调配.

4.2 智能感知

考虑到星地融合网络传感平台对传统传感器的限制,应该设计能够胜任星地融合感知任务需求的新颖传感器.结合天地一体感知结构,传感器需要从物理层、控制层和应用层3个方面进行重新设计.其中,物理层中的频谱感知和功率控制是提高传感器频谱利用率和功率收益最大化的核心,也是设计的难点;此外,由于星地融合网络中网络的复杂异构性,在控制层,可在确保系统鲁棒性的前提下制订新的协议,以正确地将感知数据转发至应用层;最后,在应用层对感知数据加以清洗、筛选,进而完成整个感知任务.

4.3 智能接入控制

星地融合网络可以为用户设备提供广泛的通信覆盖,而天基网络是地基网络的补充.星地融合网络必须能无缝地将天基网络与地基网络连接,应该具有高度的动态性和智能性,以支持种类繁多的服务.但是,星地融合网络中用于随机访问的设备主要包括以下两方面:1) 传输覆盖范围有限.由于位置分散,并且信道条件变化多样,所以无法每次都成功接收到用户设备发出的随机传输信号,尤其是会出现传输范围有限的低功耗设计情况;2) 接入

设备多样. 如表2所示, 天基网络和地基网络中接入点的差异很大, 需要对这些接入设备进行集中控制^[29]. 因此, 设计有效的接入控制机制成为目前面临的一项重大挑战, 有必要为用户设计适当的访问和切换标准, 以便集中控制接入设备. 此外, 接入设备网络环境的高度动态性以及资源和服务的多维异

构性, 使网络中的部分区域接入资源冗余而部分接入资源不足, 因此在进行资源分配时, 应考虑不同部分的特性. 可以研究如何利用时变资源图来描述卫星和空中网络资源的演变, 进一步将时变资源图与地面的可用资源结合, 以动态地为用户提供服务, 保证接入资源和数据传输的质量.

表2 星地融合智能组网中不同接入设备对比

接入设备	高度/km	使用寿命	容量	速度	飞行路线	覆盖范围	延迟	施工期	成本
地面基站	-	24 h 服务, 寿命 < 15 a	高	静止	-	低	低	慢	高
无人机	< 0.500	每次飞行不到 30 min	低	变速	可控	低	低	快	低
民航	10	10 ~ 12 h, 每天提供服务	高	中速	固定	中等	中等	快	低
近地卫星	500 ~ 2 000	24 h 服务, 寿命在 3 ~ 5 a	低	快速	固定	高	高	慢	高

4.4 多维网络切片

由于需要考虑业务 QoS、网络质量、资源富裕度等多维度信息, 如何构建网络切片并且在服务过程中实现网络切片的实时匹配还有待研究. 目前有研究通过机器学习为用户智能地匹配网络切片, 但是输入多维度的实时信息会导致机器学习匹配结果产生过长的收敛时延. 因此, 为了在保证 QoS 的同时还能提高资源的利用效率, 设计合适的算法和多维度网络切片还有待进一步研究.

4.5 确定性路由

时变连续图生成图形的过程中, 节点的移动性、接入与退出的状态切换等使得一体化组网架构高速动态变化, 如何快速准确地获取节点数量、节点位置、链路状态等通信状态信息是急需解决的问题. 此外, 确定性路由由算法相较于传统开放式最短路径优先等静态路由算法, 处理数据量较大. 通过感知周围节点的变化, 实时更新路由表信息状态, 需要更强大的数据库存储和计算能力, 降低算法的计算时间复杂度是进一步研究的课题. 确定性路由协议在星地融合网络的 IP 承载网应用过程中, 可能会出现个别设备不兼容的问题, 如何使协议正常运行, 保护协议的安全有待研究.

4.6 星地融合网元设备硬件设计

考虑到星地融合智能网络中多样化的应用场景以及不同场景对星地融合传输数据率、带宽、节点计算速度、存储容量等能力的较高需求, 星地融合网络网元设备的硬件设计至关重要. 此外, 星地融合网络中天基网络和地基网络中多种复杂异构网络互连, 且与地面网络运行环境存在较大差异, 在硬件设

计时也要考虑到不同网络之间的差异性. 即需要从硬件层面对现有的协议、算法等进行优化, 或者提出适用性更高的方案, 星地融合网元设备才能具有高通用性和较高的性价比.

4.7 长变时延

星地融合网络将地基与天基多层网络进行结合, 以满足未来网络多元化需求, 所涉及的多场景、多业务要求更小的传输时延. 但星地融合组网中星间以及星地间的节点链路较长, 与现有地基网络相比传输时延高, 网络性能及各式业务的实现受到限制. 同时, 在链路及时延影响下网络拓扑易变, 进一步影响到数据的端到端可传输时延, 致使泛在通信需求难以得到满足. 目前有研究通过多级边缘计算、深度强化学习等方式降低时延, 提升资源利用率. 如何结合多种方式, 在满足泛在需求的情况下应对长变时延带来的困境也是未来的研究方向.

4.8 动态拓扑

在星地融合网络中, 网络节点拓扑具有动态性. 首先, 卫星、航天器等节点会增加、失效或更新, 不同节点间会建立新的连接或断开原有链路; 其次, 不同卫星按照各自的轨道有规律地飞行, 时间不断更迭, 空间相对位置不断改变, 网络拓扑结构实时变化; 同时, 无人机等航空飞行器具有极强的机动性, 在空中需按照指令不断改变自身位置, 经常会产生极不规则的网络拓扑^[30]. 网络拓扑的动态性大大增加了星地融合网络的管理难度, 故要求 SDN 控制器实时掌握节点状态信息, 不断更新与下发新的流表, 保障业务链路连通顺畅.

5 结束语

针对第6代移动通信系统广覆盖的服务要求以及对未来丰富应用的性能保证,介绍了当前星地融合智能组网与SDN相结合的愿景以及现有关键技术的发展状况,旨在为星地融合网络的发展提供研究思路.讨论了如何在不受地理条件限制的情况下将具有较大容量的卫星和地面网络融合,以满足用户随时随地、稳定、可靠、连续的通信网接入需求和服务质量,同时使长期保证硬件资源有限的天基网络能够紧跟地基网络和业务的长期发展.提出了组网架构、数据感知、接入控制、多维网络切片、时敏性路由转发等关键技术,并给出了现存的问题和下一步的研究方向.

参考文献:

- [1] 陈晨, 谢珊珊, 张潇潇, 等. 聚合SDN控制的新一代空天地一体化网络架构[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(5): 450-454, 459.
Chen Chen, Xie Shanshan, Zhang Xiaoxiao, et al. A new space and terrestrial integrated network architecture aggregated SDN[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015, 10(5): 450-454, 459.
- [2] 吴巍, 秦鹏, 冯旭, 等. 关于天地一体化信息网络发展建设的思考[J]. 电信科学, 2017, 33(12): 3-9.
Wu Wei, Qin Peng, Feng Xu, et al. Reflections on the development and construction of space-ground integration information network [J]. Telecommunications Science, 2017, 33(12): 3-9.
- [3] 黄韬, 刘江, 汪硕, 等. 未来网络技术与发展趋势综述[J]. 通信学报, 2021, 42(1): 130-150.
Huang Tao, Liu Jiang, Wang Shuo, et al. Survey of the future network technology and trend[J]. Journal on Communications, 2021, 42(1): 130-150.
- [4] Liu Jun, Du Xinqi, Cui Junhong, et al. Task-oriented intelligent networking architecture for the space-air-ground-aqua integrated network [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(6): 5345-5358.
- [5] Zhu Xiangming, Jiang Chunxiao, Kuang Linling, et al. Two-layer game based resource allocation in cloud based integrated terrestrial-satellite networks[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2020, 6(2): 509-522.
- [6] Zhang Yuandong, Yin Liuguo, Jiang Chunxiao, et al. Joint beamforming design and resource allocation for ter-

- restrial-satellite cooperation system [J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 68(2): 778-791.
- [7] Deng Boyu, Jiang Chunxiao, Yan Jian, et al. Joint multigroup precoding and resource allocation in integrated terrestrial-satellite networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 8075-8090.
- [8] 侯筠仪, 赵黎晔, 申景诗, 等. 基于SDN架构的NFV技术在低轨卫星网络中的应用[J/OL]. 中国空间科学技术: 1-8[2021-05-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1859.V.20201221.0950.002.html>.
Hou Junyi, Zhao Liye, Shen Jingshi, et al. The application of NFV based on SDN architecture in LEO satellite network [J/OL]. Chinese Space Science and Technology: 1-8[2021-05-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1859.V.20201221.0950.002.html>.
- [9] Papa A, De Cola T, Vizarreta P, et al. Dynamic SDN controller placement in a LEO constellation satellite network [C] // 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Abu Dhabi, United Arab Emirates: IEEE Press, 2018: 206-212.
- [10] Mendoza F, Ferrús R, Sallent O. A traffic distribution scheme for 5G resilient backhauling using integrated satellite networks [C] // 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). Valencia: IEEE Press, 2017: 1671-1676.
- [11] Vilalta R, Mayoral A, Casellas R, et al. SDN/NFV orchestration of multi-technology and multi-domain networks in cloud/fog architectures for 5G services [C] // Optoelectronics & Communications Conference. Niigata: [s. n.], 2016: 1-3.
- [12] 李晶林, 万晓兰. 基于端侧计算的天地一体化SDN实现思路[J]. 电信科学, 2020, 36(7): 80-91.
Li Jinglin, Wan Xiaolan. SDN resolve space-ground integrated network based on end side computing [J]. Telecommunications Science, 2020, 36(7): 80-91.
- [13] Du Jun, Jiang Chunxiao, Zhang Haijun, et al. Auction design and analysis for SDN-based traffic offloading in hybrid satellite-terrestrial networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(10): 2202-2217.
- [14] Ma Lu, Wen Xiangming, Wang Luhan, et al. An SDN/NFV based framework for management and deployment of service based 5G core network [J]. China Communications, 2018, 15(10): 86-98.
- [15] Ahmed T, Alleg A, Ferrus R, et al. On-demand network slicing using SDN/NFV-enabled satellite ground segment systems [C] // 2018 4th IEEE Conference on

- Network Softwarization and Workshops (NetSoft). Montreal; IEEE Press, 2018; 242-246.
- [16] Ageyev D, Bondarenko O, Alfroukh W, et al. Provision security in SDN/NFV [C] // 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TC-SET). Lviv-Slavske; IEEE Press, 2018; 506-509.
- [17] Du Jun, Jiang Chunxiao, Zhang Haijun, et al. Secure satellite-terrestrial transmission over incumbent terrestrial networks via cooperative beamforming[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(7): 1367-1382.
- [18] Zhu Xiangming, Jiang Chunxiao, Yin Liuguo, et al. Cooperative multigroup multicast transmission in integrated terrestrial-satellite networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(5): 981-992.
- [19] Zhu Xiangming, Jiang Chunxiao, Kuang Linling, et al. Non-orthogonal multiple access based integrated terrestrial-satellite networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2253-2267.
- [20] Kuang Linling, Chen Xi, Jiang Chunxiao, et al. Radio resource management in future terrestrial-satellite communication networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(5): 81-87.
- [21] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 1-16.
Wu Wei. Survey on the development of space-integrated-ground information network [J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 1-16.
- [22] Zhang Ning, Zhang Shan, Yang Peng, et al. Software defined space-air-ground integrated vehicular networks; challenges and solutions [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(7): 101-109.
- [23] Sun Jie, Liu Feng, Ahmed M, et al. A unified framework for software defined sensing, transmission and computing[J]. IEEE Access, 2019, 7: 48923-48934.
- [24] Bai Lin, Han Rui, Liu Jianwei, et al. Relay-aided random access in space-air-ground integrated networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(6): 37-43.
- [25] Tikhonov E, Schneps-Schneppe D, Sneps-Sneppe M. On joint satellite, terrestrial, and delay tolerant networks for railroad communications[C] // 2021 28th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). Moscow; IEEE Press, 2021: 472-481.
- [26] 李红艳, 张焘, 张靖乾, 等. 基于时变图的天地一体化网络时间确定性路由算法与协议[J]. 通信学报, 2020, 41(10): 116-129.
Li Hongyan, Zhang Tao, Zhang Jingqian, et al. Time deterministic routing algorithm and protocol based on time-varying graph over the space-ground integrated network[J]. Journal on Communications, 2020, 41(10): 116-129.
- [27] Niephaus C, Kretschmer M, Ghinea G. QoS provisioning in converged satellite and terrestrial networks: a survey of the state-of-the-art [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2415-2441.
- [28] Zhu Xiangming, Jiang Chunxiao, Kuang Linling, et al. Cooperative transmission in integrated terrestrial-satellite networks[J]. IEEE Network, 2019, 33(3): 204-210.
- [29] Chen Qian, Meng Weixiao, Li Shuxun, et al. Civil aircrafts augmented space-air-ground integrated vehicular networks: motivation, breakthrough and challenges[EB/OL]. (2021-02-12) [2021-06-01]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9353708>.
- [30] 于少波, 吴玲达, 张喜涛, 等. 面向空间信息网络的多种特征可视化方法综述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13(2): 201-208.
Yu Shaobo, Wu Lingda, Zhang Xitao, et al. Survey of multi-feature visualization for space information network [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2018, 13(2): 201-208.