



专题: 5G+6G

软件定义的星地融合智能无线网络

袁硕, 任奕璟, 王则予, 孙耀华, 彭木根

(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: 星地融合网络可以提供天空地海立体全场景信息覆盖, 满足未来网络全业务差异化通信需求, 已经成为 6G 发展的热点。首先, 调研了低轨卫星星座和星地融合组网发展现状, 讨论了星地融合组网面临的问题与挑战。针对星地融合网络结构复杂、拓扑高动态、设备及协议异质性强等特点, 提出了基于分布式 SDN 控制器的软件定义星地融合智能无线网络体系架构, 以进行高效地星地协同网络管控。最后, 介绍了星地柔性可重构协同组网的关键技术, 并对未来发展进行了展望。

关键词: 星地融合网络; 软件定义网络; 人工智能; 柔性可重构组网

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi:10.11959/j.issn.1000-0801.2021123

Software defined intelligent satellite-terrestrial integrated wireless network

YUAN Shuo, REN Yijing, WANG Zeyu, SUN Yaohua, PENG Mugen

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

Abstract: With the superiorities of providing network services for all scenarios of three-dimensional space, air, ground, and ocean, and satisfying the future network differential requirements on all services, the satellite-terrestrial integrated network (STIN) has become a hot spot in the development of 6G. Firstly, the current research development of the low-orbit satellite constellation and STIN were reviewed, and the challenges faced by the integrated satellite-terrestrial networking were discussed. Then, the software defined intelligent system architecture of the integrated satellite-terrestrial wireless network based on distributed SDN controllers was proposed to address the characteristics of STIN such as the complex architecture, high dynamic of network topology, the heterogeneity of network devices and protocols, which facilitated efficient satellite-terrestrial collaborative network management and control. In the end, the key techniques of the satellite-terrestrial flexible and reconfigurable collaborative networking were outlined, and the future development were presented.

Key words: satellite-terrestrial integrated network, software defined network, artificial intelligence, flexible and reconfigurable networking

收稿日期: 2021-05-10; 修回日期: 2021-06-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2020YFB1806703); 国家自然科学基金资助项目 (No.61925101, No.61831002, No.62001053); 中央高校基本科研业务费资助项目 (No.24820202020RC11)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1806703), The National Natural Science Foundation of China (No.61925101, No.61831002, No.62001053), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.24820202020RC11)

1 引言

随着 5G 大规模部署工作的进行,致力于实现全场景、全应用的全球无缝智慧连接、深度连接和泛在连接通信愿景的 6G 研究也在不断展开^[1-2]。然而,依赖于基站和光纤等基础设施的地面移动通信系统,受制于部署环境和经济成本,目前仅覆盖了约 6% 的地表面积,难以满足天空地海广域立体通信需求;并且,对于地震和海啸等自然灾害容忍度较低,回传网络易被摧毁而造成通信系统瘫痪;此外,无法有效支撑处于高速运动状态终端不间断的服务请求^[3]。

针对这些问题,业界普遍认为具有广阔的覆盖范围、强健的抗毁能力和稳定持续的交付性能的卫星通信网络可作为地面移动通信网络的有力补充,通过深度整合构建的星地融合网络,可以在人口密集区域发挥高密度基站的优势,实现大容量海量接入;在人口稀疏区域发挥卫星广域覆盖的优势,实现全地域全时随选接入。参考文献[4]探讨了现有地面网络架构在星地融合网络中的可用性,并深入讨论了星地融合网络的系统集成、协议优化、资源管理和分配等问题。参考文献[5]针对未来应用极大容量的需求和星地链路较长的传播时延等问题,总结了星地融合网络在保障服务质量方面所涉及的关键网络功能。参考文献[6]介绍和分析了卫星通信网络和地面移动通信网络的差异,提出了多个星地网络协作模型,并进一步研究了各模型所涉及的关键技术。参考文献[7]回顾了星地融合网络代表性架构,并按照传输、控制和管理、资源分配和安全对有关研究进行了梳理总结。

尽管针对星地融合网络的研究已经取得了一些进展,但是如何解决星地融合网络结构灵活性差、差异化业务适配性低、网络智能化不足和资源利用率低等问题,实现敏捷柔性可重构组网,提供面向业务需求的资源配置和服务保障仍面临

重大挑战。通过利用软件定义网络 (software defined network, SDN) 和网络功能虚拟化 (network function virtualization, NFV) 技术,将有效处理卫星通信网络和地面移动通信网络从设备和协议的异质性到网络功能和架构的异构性^[8-9];引入人工智能 (artificial intelligence, AI) 技术,能够完成细粒度网络资源的智能协同管理和调度^[10-11],进而实现星地融合网络按需智能化组网,显著降低融合网络的运维复杂度和成本。

2 LEO 卫星通信与星地融合

根据轨道高度,卫星可以分为地球静止轨道 (geostationary earth orbit, GEO) 卫星、中地球轨道 (middle earth orbit, MEO) 卫星和低地球轨道 (low earth orbit, LEO) 卫星,各轨道卫星特点见表 1。其中,LEO 卫星由于距离地表较近,相对于 GEO 和 MEO 卫星有较低的发射成本、较短的传输时延和较高的数据传输率,并且对地面终端有较低的信号功率容忍度,有助于地面终端的小型化。另一方面,相关技术的快速迭代也不断强化新型低轨星座的优势。首先,集成电路技术的进步使卫星模块化和小型化变成现实,卫星规模化、批量化生产成为可能,大幅降低了卫星研制和生产成本,同时显著提升了星上处理能力,为潜在的星上计算和优化提供算力支撑;其次,包括一箭多星和火箭回收等火箭发射技术的突破极大地降低了卫星的发射成本;另外,基于毫米波、太赫兹、可见光通信技术的星际链路通信技术的发展,将大幅减少卫星通信对星地链路的需求和对地面信关站的依赖^[3]。

目前,世界各国纷纷开启新型低轨卫星星座的规划和部署。其中,OneWeb 星座计划在海拔 1 200 km 的 12 个低轨道面部署 882 颗卫星,每颗卫星配备 16 个用户波束以确保用户在仰角大于 55°时至少有一颗 OneWeb 卫星覆盖;Starlink 星座计划在海拔 540~570 km 和 1 150~1 325 km 的低



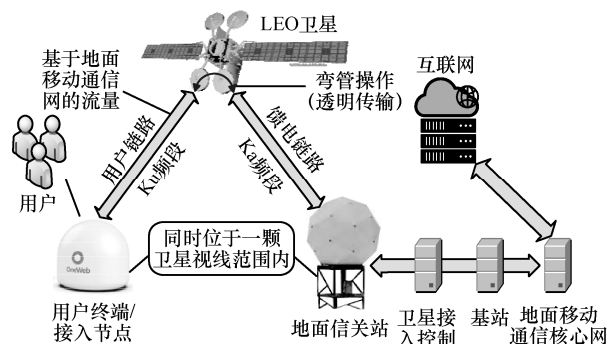
表 1 卫星通信网络与地面移动通信网络的特征、优势和局限

对比项	通信实体	海拔/km	移动性	双向时延/ms	优势	局限
卫星通信网络	GEO	35 786	与地面相对静止	250~280	广覆盖、广播/多播	较长的传输时延、有限的带宽、成本高昂
	MEO	3 000~20 000	中等速度移动	110~130		
	LEO	200~3 000	快速移动	20~25		
地面移动通信网络	基站		静止	极低	资源密集、高吞吐量	有限的覆盖范围、灾害抵抗力差

轨空间部署约 30 000 颗卫星以实现高通量的数据传输；两个星座均采用 Ku 频段作为用户链路，Ka 频段作为馈电链路。另外，相比于未配置星间链路的 OneWeb 星座对地面信关站的强依赖，规划了星间链路的 Starlink 在未来星际组网具有更大的灵活性。有公开数据显示，目前 OneWeb 和 Starlink 分别能够提供单星峰值容量 9.97 Gbit/s 和 21.36 Gbit/s，往返时延 50 ms 和 20 ms 左右的数字通信服务。

2.1 星地融合组网

尽管 LEO 卫星通信正在蓬勃发展，但除了广域无缝持续覆盖的优势外，其在人均建设和运维成本、终端成本和通信速率等方面相比地面移动通信总体处于劣势。因此，相对于取代地面移动通信网络的发展定位，LEO 卫星通信网络更应该“兼容 5G、融合 6G”^[3]。目前，新型 LEO 卫星星座已经初步具备与地面网络组网的能力。第一代 OneWeb 星座星地融合组网方案如图 1 所示，通过地面特定用户终端/接入节点将地面移动通信网络的流量经由 LEO 卫星转发到地面信关站，并交付给地面移动通信系统的基站和核心网处理。其中，卫星只负责射频信号的转发接口，所有空中接口的处理交由地面移动通信系统完成。采用弯管操作的星地融合组网，可以直接使用现有地面移动通信网络架构完成透明传输，但是缺乏星载边缘计算的支撑将极大地降低星上无线资源实时智能分配与优化和边缘服务快速响应的能力。此外，所有流量都需经由用户链路和馈电链路转发，将带来不可忽略的传输时延，同时占用过多的星地链路频谱资源。

图 1 OneWeb 星座星地融合组网方案^[12]

3GPP 从 R14 开始卫星与 5G 系统的融合研究，并于 2016 年在 TS22.261 讨论引入卫星接入技术作为 5G 的接入技术之一。在 TR38.811 中介绍了非地面网络的作用和关键组成，并根据弯管与再生两种星上载荷方案和是否需要卫星终端作为中继提出了 4 种候选网络架构。在 TR22.822 中提出非地面网络服务的持续性、泛在性和可扩展性交付 3 种用例类别。此外，ITU 提出了中继到站、小区回传、动中通、混合多播 4 种 5G 星地融合应用场景，并提出包括智能路由支持、动态缓存管理及自适应流支持、一致性服务质量和多播支持等多个各场景必须考虑的关键因素。另外，欧盟支持的 Sat5G 项目确定了卫星通信融入 5G 系统的六大研究支柱，包括跨卫星网络部署 5G SDN 和 NFV、融合网络管理和编排、多链路和异构传输、卫星通信与 5G 控制面与用户面的协调、5G 安全在卫星中的扩展和用于缓存和虚拟网络功能部署的缓存和多播技术。

2.2 问题与挑战

通过深度整合卫星网络与地面网络以构建星地融合网络，能够响应未来面向万物智联与全球

立体广域覆盖的通信需求,实现6G面向全场景、全业务的服务交付愿景。然而,星地融合组网仍然面临以下诸多挑战。

- 卫星网络配置固定及难以更新,星上载荷支撑的服务和应用类型有限。通信技术和应用服务的快速发展使早先发射的卫星逐渐难以满足用户的通信需求。此外,传统卫星管控策略与星载硬件的深度耦合和异种设备间的差异化配置方案都增加了网络管控的复杂度,降低了网络功能部署和更新的灵活性。
- 不同卫星星座间资源和信息隔离。尽管目前启动的LEO卫星星座计划众多,但各星座采用的通信技术和网络协议不尽相同,使得不同星座之间相互隔离,难以进行全面硬件共享和信息交互,将极大地浪费在轨网络资源。
- 网络拓扑高动态,管控困难。除GEO卫星外,其他不同轨道面的卫星与卫星、卫星与地面信关站和卫星与用户终端间相对位置的高速变化给层次化和立体化的复杂动态星地融合网络的管理和控制带来极大挑战。
- 星地融合网络资源协同调度与优化困难。卫星通信网络与地面移动通信网络在组成设备、通信技术、网络协议和架构等方面的显著差异,以及两者间存在的信息孤岛等问题,对星地融合网络资源协同调度与优化提出了严峻的挑战。

作为一种新型网络体系架构,SDN通过解耦控制面和数据转发面,打破传统网络中的垂直集成,通过构建开放、可编程和易修改的通用接口,实现网络功能的软件化和交互便利化。另一方面,NFV技术通过将依赖专用、专有硬件的网络功能虚拟化为可在云计算平台或通用硬件运行的软件,实现网络功能与硬件的解耦,破除硬件厂

商的深度绑定,从而提高网络部署和运维的灵活性,支撑网络服务的快速创新和迭代。通过将SDN和NFV与星地网络有效融合,可有效应对上述挑战。

3 软件定义的星地融合智能无线网

3.1 网络架构

面向广域立体无缝覆盖下多样化的应用场景和差异化的用户需求,基于SDN、NFV、网络切片和分布式AI等技术,提出了一种软件定义的星地融合智能无线网络架构,其组成示意图如图2所示。该架构使用SDN技术分离网络的控制平面和数据平面,通过统一开放接口提升网络可编程性和可重构性以处理星地融合网络中设备和协议异质性问题,并引入具有全局网络视图的SDN控制器实现星地多域异构网络具有业务适应性的资源统一管理和跨域动态配置。

通过对卫星网络和地面移动通信的各个网络功能进行柔性分割,实现网络功能的模块化部署,能够完成对3GPP的弯管转发和再生处理两种组网方式的高效兼容。具体地,根据不同场景和业务对星上处理的需求,卫星可基于NFV技术自适应部署接入网用户平面功能、接入网控制平面功能和部分核心网功能等,实现按需灵活的组网配置,保障网络整体服务质量。此外,基于NFV技术在卫星和地面网络边缘可部署多接入边缘计算(multi-access edge computing, MEC)服务,以就近支撑计算或数据密集型应用,降低传输时延和星地回传链路负担。同时,基于MEC的内容/服务缓存可极大提高内容/服务的交付效率。

针对偏远地区应用场景,可直接通过LEO卫星弯管载荷完成地面终端射频信号的转发,然后借助信关站传输到地面接入网用户平面、控制平面和核心网进行处理,完成精简快速组网,实现用户流量的透明传输,同时也可降低星上处理负担。针对海洋和极地作业及终端处于高速移动状

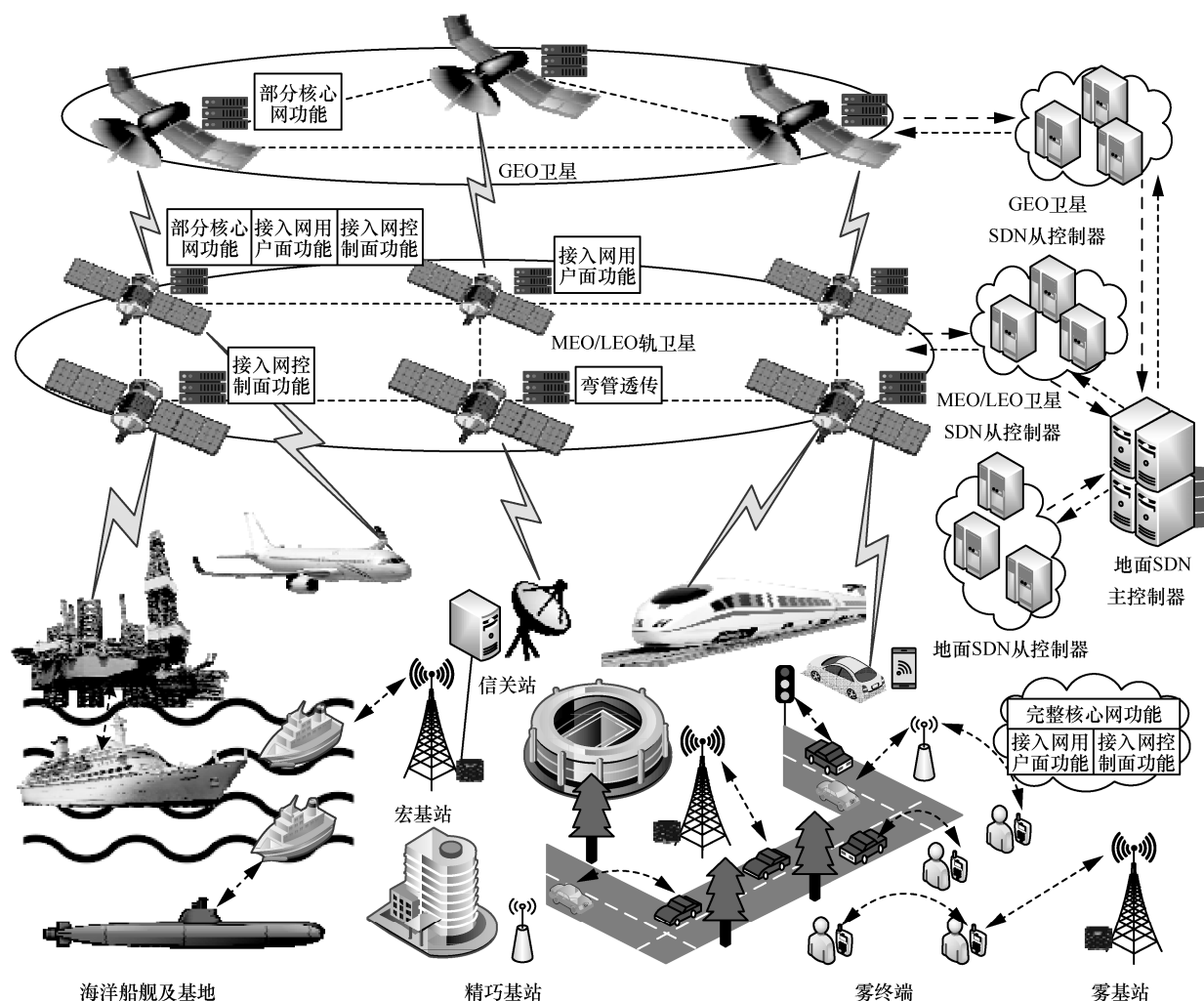


图2 软件定义的星地融合智能无线网络架构组成示意图

态的高铁、航空等应用场景,可通过将部分核心网功能部署在 GEO 卫星用于为其覆盖范围内具有接入网用户平面和控制平面功能的中低轨接入卫星提供服务,实现卫星独立组网,降低星地链路频繁信令交互产生的开销和时延。为应对由自然灾害、物理攻击等损毁地面移动通信基础设施造成通信中断等问题,可通过配置接入网用户平面和接入网控制平面的卫星,实现关键业务上星备份,构建稳定的通信网络。此外,针对巨容量高保真通信需求,可通过配备边缘计算功能的卫星,实现网络边缘端的信号处理和内容分发以及卫星端的测量与智能数据分析;针对巨连接物联网通信需求,借助卫星的广域覆盖和星上大规模

干扰协作处理,实现物联网终端的海量接入和数据的星上汇聚与分析,同时降低馈电链路的通信负载,响应气象水文地址监测、野生动物保护、交通运输和工业制造等大规模机器通信需求。

考虑 LEO 卫星快速移动导致用户频繁波束切换或星间切换和用户激增产生的大量控制平面数据对星地链路的占用等问题,提出分布式主从 SDN 控制方案。其中,SDN 主控制器位于地面,负责协调分布式 SDN 从控制器并完成星地网络全局视图构建,实现全网资源统一管理和编排、网络拓扑发现和维持、负载均衡和路由决策等。此外,得益于较大的覆盖范围和相对稳定的星地链路,同步轨道卫星可搭载 SDN 从控制器,负责覆

盖范围内 LEO/MEO 卫星的网络管理和控制。在卫星网络流量和服务负载密集区域,部分 LEO/MEO 卫星可搭载 SDN 从控制器通过星间链路实现邻近范围内卫星分组管理,以应对由于 LEO/MEO 卫星数量的逐渐增加以及用户服务请求的差异化 and 复杂化造成同步轨道卫星 SDN 从控制器管理负担过大等问题。

与此同时,将 AI 和分布式主从 SDN 控制器进行整合可构建分布式网络智能编排系统,通过分析海量业务、网络状态和管控数据形成知识库,并借助 SDN 主从控制器分别完成知识库的线下构建和线上更新,实现星地网络资源的自动化、智能化的按需管理和编排。具体而言,结合 SDN 主从控制器收集的状态数据,可实现网络故障预警和预测性维护;针对特定应用场景和业务需求,能执行网络切片智能化构建和编排,进而实现柔性可重构星地融合无线组网。

3.2 分层逻辑结构

软件定义的星地融合智能无线网络结构如图 3 所示,其逻辑结构包括 3 层:基础设施层、控制层和应用层。其中,基础设施层由包括 LEO/MEO 卫星、地面交换机、信关站和基站等在内的星地多域网络中具有通信、计算和存储等资源的设备实体组成。通过采用 NFV 技术解耦网络功能和网络硬件,破除传统网络设备专用硬件壁垒,将星地异构网络设备演化为承载可重构网络功能的基础硬件设施并抽象成虚拟网络资源池,从而构建星地融合分布式网络功能虚拟化平台,并根据 SDN 控制器指令承载虚拟网络功能及构建网络切片。

控制层由分布式主从 SDN 控制器组成,负责应对集中式控制单点故障、可扩展性差及负载不均衡和卫星节点载荷受限等问题,并通过开放的南向接口(southbound interface, SBI)实现对底层物理基础设施的管理,同时向上层提供虚拟网络功能。此外,部署于地面的 SDN 主控制器通过东西向接口(eastbound/westbound interface,

EBI/WBI)与地面移动通信网络和卫星网络中的 SDN 从控制器交互,从而获取全局网络状态和服务侧写以构建全网视图,实现网络的协同管理与控制,并制定和下发星地网络的缓存更新策略、路由策略和虚拟网络功能部署与撤销指令等。为了有效屏蔽卫星网络和地面移动通信网络的异构性,可针对不同制式网络进行 SBI 的定制化开发和部署,实现 SDN 主控制器对物理资源的跨域协同调度。另外,针对人口密度不均和业务请求的潮汐特性产生的潜在流量和业务负载不均衡问题,部署于 SDN 主从控制器的 AI 引擎基于大数据技术可进行深度流量分析和管控,并实现路由策略预更新和网络资源协同预调度。其中,SDN 主控制器基于集中式 AI 引擎实现全网粗粒度的网络管控,SDN 从控制器基于分布式 AI 引擎和主控制器下发的管控策略及区域内的网络状态实现细粒度的网络管控。

应用层通过北向接口(northbound interface, NBI)向控制层获取全网状态和虚拟网络功能接口,从而部署丰富的柔性可编程服务和网络管理模块(如移动性管理、流量工程、故障恢复、安全策略和切片服务等)。具体而言,应用发出的请求由 NBI 转译成 SDN 控制器规则,并经由控制层提供的虚拟网络功能通过 SBI 转译为基础设施操作指令以完成服务响应。此外,应用层基于可预测的星历图和全局网络状态,可以提供智能星地、星间或波束切换和移动性管理功能,以解决星地网络动态拓扑问题,进而实现服务交付的持续性。另一方面,基于深度包检测和 AI 技术将数据流量与多样化的服务相关联,并划分不同 QoS 或 QoE 类,引导数据流向,实现面向质量/体验的智能服务交付。同时,数据流量的智能引导与路由策略的智能预更新将有效地避免网络拥塞,实现网络负载均衡。

4 关键技术

为了充分利用卫星通信网络广域无缝覆盖能

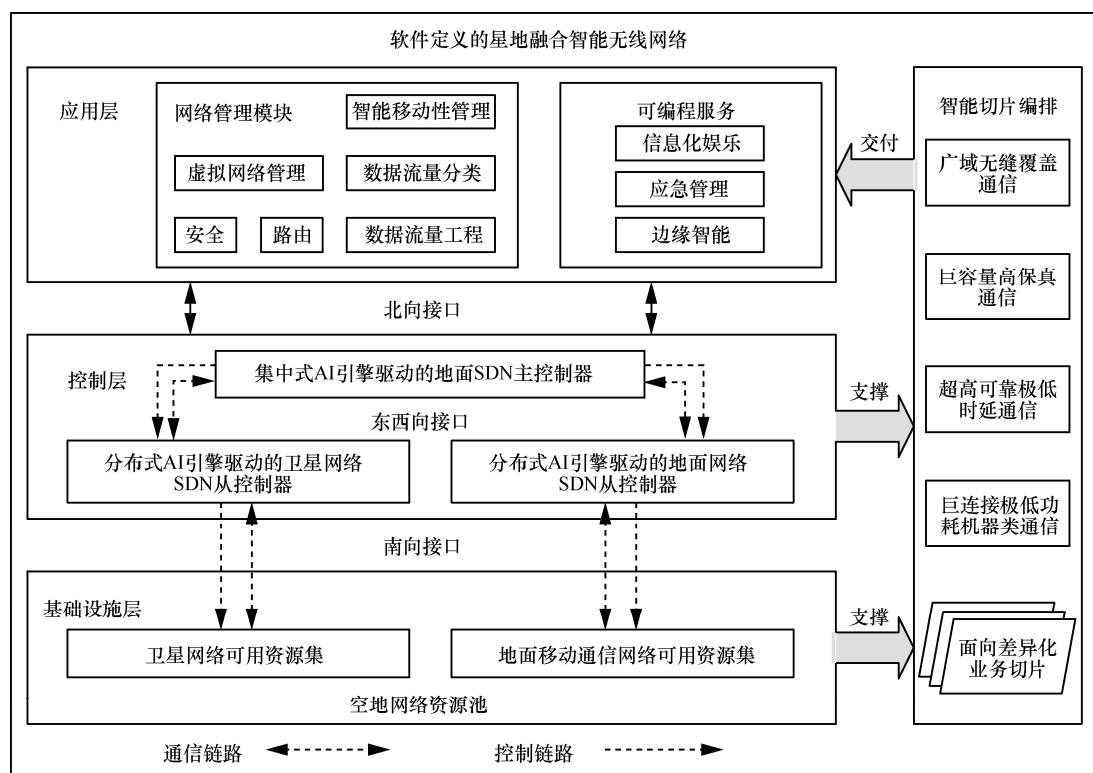


图3 软件定义的星地融合智能无线网络结构

力和地面移动通信网络密集且丰富的网络资源，发挥软件定义的星地融合智能无线网络的性能潜力，需要对以下关键技术进行深入研究。

4.1 无缝切换和移动性管理

星地融合网络全场景广域无缝通信服务交付的实现依赖于用户在卫星通信网络和地面移动通信网络之间灵活的无感切换。然而，非地球同步轨道卫星相对地面的高移动性将导致用户和卫星间用户链路发生频繁的波束切换或星间切换，增加了服务中断风险和网络管理开销。因此，如何有效处理星地融合网络的切换和移动性管理问题，并在保障用户服务质量的前提下设计出实现最小化切换次数的切换策略是星地融合网络的一个重要课题。与地面移动通信网络基于信号强度进行切换决策不同，卫星通信的波束边缘与波束中心点的信号强度差异较小，很难确定具有普适性的切换阈值。同时，由于星地链路较长的传输时延，接收端的多样性和潜在的高移动性，

以及服务需求的差异性，都为星地融合网络的移动性管理提出了更高的要求。此外，星地链路的强周期切换也对切换的敏捷性和可靠性带来了挑战。

针对传统卫星网络架构下采用单一指标进行波束切换决策产生的切换失败率高和乒乓切换等问题，参考文献[13]提出多波束多决策指标切换机制，其算法流程如图4所示。通过综合考虑接收信号强度、链路丢包率和网络时延等指标，使用接收信号强度反映当前用户所在波束中信道质量，链路丢包率和网络时延反映数据传输的损耗率。具体而言，首先通过SDN控制器的全局状态信息完成用户场景判断，进而确定用于切换决策的指标；然后完成相关性对比并构建判定矩阵，并依据各指标的权重确定优先度计算总体情况评估值；最后根据该值确定切换时间阈值顺序，完成切换决策，从而实现高精度、细粒度切换。

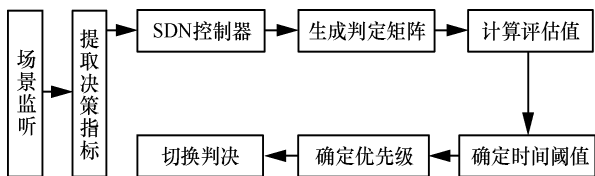


图4 多决策指标切换算法流程

在针对星地融合网络进行切换机制制定和移动性管理时，还应当充分考虑轨道卫星位置的可见性。用户终端可以根据时间相关的星历图确定下一轮预接入波束或卫星，并进行切换准备。同时，卫星节点也能够实现面向覆盖区域的切换预测，并为即将进行切换的波束在下一覆盖波束中预留信道。通过引入切换请求队列排序方法基于信道预留的波束切换机制可以有效保证全网波束间和星间的平滑、同步切换。

4.2 智能路由

为实现低时延的端对端数据传输，需要设计有效的路由算法以寻找高可靠性的最短数据转发路径。然而，星地融合网络动态变化的拓扑结构、有限的星上处理能力和链路资源，使得星上路由规划面临重大挑战。此外，不断增长的业务种类以及不同种类的业务对服务质量的差异化需求，对借助星间链路实现流量转发的路由策略的制定提出了更高的要求。另一方面，全球人口具有显著的聚集效应，地表用户分布极度不均匀，使得不同卫星的业务请求量不均衡。另外，不同地区的经济发展状态和业务潮汐特点进一步加重了这种星间负载不均衡的现象。因此，如何设计星地数据路由策略，实现面向业务类型的转发路径规划，完成差异化服务质量需求的业务交付，并解决卫星网络中流量分布不均衡问题是星地融合网络中的一项关键研究。

随着软件定义的星地融合网络不断扩张的网络规模和愈加复杂的业务请求，流表项目数和所需存储空间将不断增大，从而导致低效的流表项查找和匹配，显著降低流量路由效率。在参考文献[14]中，通过收集网络中路由请求信息并提取用

户流量的业务类型、源地址、目的地址和路径信息以构造训练样本集，并在地面 SDN 控制器使用 Chebyshev 神经网络模型学习数据流量的特征和传输模式，而后把训练好的模型下发到数据面各转发节点代替流表进行智能快速路由决策。

针对卫星网络特殊的运行环境而可能存在的由干扰引起的临时链路故障和设备问题引起的永久端口故障等造成星间路由故障的问题，参考文献[15]提出基于大数据的故障监测和基于 Q-learning 的路由恢复技术。首先，通过根据网络故障数据训练 AI 模型，实现临时链路故障和永久端口的故障分类、故障链路和节点端口的定位。然后，将当前节点和目的节点作为状态，相邻节点作为动作，由排队时间、传输时间和链路寿命组成的指标作为 Q 值构建 Q-learning 模型，并针对不同类型的故障，更新相关节点的局部状态空间和动作空间的 Q 值，进而在区分故障类型情况下完成路由恢复。

4.3 多维资源智能调度

随着集成电路技术的发展，计算和缓存模块将逐渐小型化、微型化，使得卫星星载处理和缓存能力得到显著提升。然而，随之而来的用户业务星上上传需求的日渐增长，星地网络复杂的网络架构、周期性变化的网络拓扑以及指数级增长的数据量让卫星通信网络通信、计算和缓存服务交付的及时性和可靠性面临重大挑战。尽管 SDN 架构能够有效实现多维、多源网络信息的采集、传输、处理与跨域共享和逻辑上集中式资源管控，但传统 SDN 资源管理和分配算法大多只针对特定的卫星网络拓扑和特殊业务服务功能，且过于依靠算法模型的低复杂性和近似性，缺乏对资源实时状态的自适应。此外，多维资源紧耦合状态且差异化的调度方式以及多性能指标的优化目标都进一步增加了多维资源联合调度优化的难度。通过引入 AI 技术，使用 SDN 控制器获取的全局网络状态信息和资源分配管控方案作为模型的样本



集，迭代训练资源管理决策模型，完成对业务请求、资源状态等网络特性的自适应，进而取代 SDN 控制器传统管控策略，实现星地融合多维资源实时有效管理与智能分配。

针对卫星系统多维资源的智能调度，参考文献[16]提出如图 5 所示基于 AI 的卫星网络资源管理架构，实现对卫星网络资源的实时智能状态分析和调度。通过地面 SDN 控制器收集的卫星网络资源状态用于 Network Mind 的 AI 模型训练，进而从历史卫星资源网络状态和资源分配方案中学习在各式各样的卫星资源网络状态和业务请求下的资源管控策略。之后，将策略发送到 SDN 控制器用于应对最新的用户资源请求，进而控制卫星完成多维资源调度。同时，相应的“状态-请求-响应”也将作为新样本用于 AI 模型的训练，从而形成卫星网络资源管理闭环优化，保证 AI 模型对新型网络状态和业务请求的适应性，提高卫星资源的分配效率。

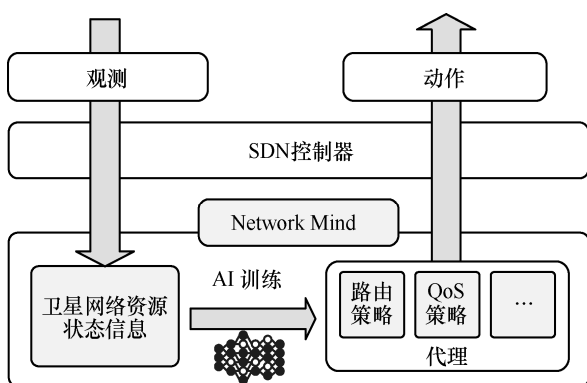


图 5 基于 AI 的 SDN + Network Mind 架构

4.4 AI 使能的服务链部署

通过 SDN/NFV 技术对星地网络硬件基础设施的虚拟化，分离控制平面和数据平面，将有效实现业务交付的集中统一管控，同时促进新业务的创新和部署。如此，网络服务提供商可以针对服务功能链（service function chain, SFC）的虚拟网络功能（virtualized network function, VNF）进行柔性的调整和扩展。目前，如何编排 SFC 以在星地网络节点有限的计算资源下满足 VNF 部署请求，同时在有限的物理链路带宽下构建满足虚拟链路带宽请求的业务流路径，完成 SFC 的映射，并降低对资源的占用实现网络效益最大化已成为热门的研究领域。然而，现有的大多数研究成果集中在单域网络的 SFC 映射，对星地融合网络的跨域场景并不适用。此外，卫星通信网络和地面移动通信网络拥有者和运营者等方面的差异，不可避免产生部分信息隔离，从而进一步增加了跨域 SFC 映射的难度。

在参考文献[17]中，针对域内部分信息隔离的情况，同时考虑 SFC 映射对传输时延和资源消耗的影响，将 SFC 跨域映射分解成 SFC 分割和子链映射两个关键问题，从而提出一种区域集中管理、全局协同调度的跨域 SFC 映射机制，其框架如图 6 所示。基于集中式 SDN 控制器的编排架构，利用全局视图构建多域网络抽象拓扑，从而降低域间映射复杂度。通过将 SFC 分割问题建模成马尔可夫决策过程，其中每个域总共可用计算资源、现有的 VNF 与各域映射关系和待处理 SFC 请求资

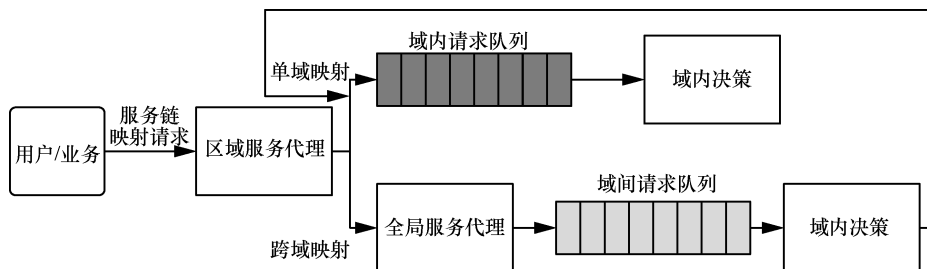


图 6 跨域 SFC 映射框架

源作为状态空间,从抽象网络拓扑选择满足条件的 VNF 域映射作为动作空间以及使用域间传输时延与映射资源成本开销刻画奖励函数,并基于 Q-learning 进行训练,进而完成 SFC 的跨域映射决策,实现 VNF 的多域均衡部署。

5 未来展望

5.1 面向场景的星地融合网络切片

星地融合网络致力于填补海洋、天空、高山和偏远地区信息鸿沟,实现广域立体无缝覆盖、提供每平方千米超百万连接和 10 Tbit/s 的巨容量随遇接入以及端到端数秒级的超低时延。具体而言,针对传统卫星应用场景(如环境监测、动物保护和交通运输等),星地融合网络将极大增加监测终端的接入数量、延伸其部署范围,同时借助星地边缘计算平台实现数据实时智能分析和反馈,提供更准确的环境监测和灾害预警、更广泛的生物追踪以及更精准的导航规划和运输溯源;对于移动宽带通信应用(如全息视频通信、VR/AR 和广域物联网等),通过构建面向差异化场景的星地融合网络切片,利用星地链路、星间链路和地基链路协同传输以及天基和地基协同计算与缓存,实现用户无感的业务统一交付。

然而,星地融合网络中不同链路无线信道的随机和时变特性增加了切片隔离的难度,为统一的切片隔离机制设计带来显著挑战。另外,卫星网络和地面移动网络在空口、协议和频谱分配等配置方面存在较多差异,如何设计资源管理机制以规避星地融合切片中接入制式的影响,提升网络接入性能也是未来亟须解决的问题之一。

5.2 时延敏感星地融合网络

全产业物联网的快速发展,使得物与物、人与物、人与人之间的信息交互与操作协同趋于智能化、常态化,进而对信息传输的时延、带宽和抖动等提出了更精细、更确定的性能要求。为了实现星地融合网络数据确定性传输,可基于分布式

主从 SDN 控制器的网络状态数据,使用 AI 技术进行时延预测并优化流量调度策略和路由路径。然而,如何训练和部署 AI 智能引擎完成对业务流量和 QoS 优先级的智能识别和分类,并综合考虑网络设备能力和目前业务队列状态,实现细粒度的计算调度将是一个具有挑战性的问题。此外,在星地融合网络动态的网络拓扑和时变的链路状态下,如何综合考虑不同链路之间的负载均衡,快速制定流量路由策略是一大挑战。另外,由于星地融合网络中不同无线链路环境的显著性差异,使得传输冗余度和传输时延权衡分析面临挑战,如何设计链路自匹配的冗余传输机制,保证流量传输的成功率和各类链路的稳定性也是未来研究方向之一。

5.3 星地融合无线传输技术

星地融合网络中涉及 3 种类型的卫星无线链路:星间链路、星地用户链路、星地馈电链路。星间链路作为实现流量星间路由和负载均衡的基础,能够有效降低卫星网络对地面通信网络和地面信关站全球部署的依赖,实现同轨/异轨卫星、星座和星群间协同组网。其中,激光通信链路由于信道容量大、抗电磁干扰能力强及保密性好等特点,被视为构建未来星间链路的主要候选。此外,微波星间链路也逐渐从 Ka 频段向太赫兹频段等更高频段发展,以适应星间信息传输需求的增长。目前,国内外对这两种新型星间链路的研究和实现都在稳步进行,未来微波和激光混合星间链路将持续并存发展。另外,对星间链路快速对准和稳定维持技术的研究也将是星地融合网络的一大重点和难点。

对于星地用户链路,新型低轨星座已经开始使用高频段(如 Ka 频段)代替低频段进行地面用户与卫星间的数据传输。星地馈电链路也逐渐从 C、Ku 和 Ka 微波频段向更高频段、大带宽和小型化的毫米波和激光通信方向发展^[18]。然而,Q/V 频段信号的链路损耗在雨雪等复杂大气环境下会



急剧增加, 对其抗雨衰减模型的建立和实验刻不容缓。此外, 如何降低天气和大气湍流对星地激光链路的影响, 提升其链路可用性也是未来研究的重点。

6 结束语

本文调研了星地融合网络的发展现状, 提出了软件定义的星地融合智能无线网络架构, 通过构建分布式主从SDN控制器完成对卫星网络和地面移动通信网络的状态监测, 整合边缘计算和人工智能构建网络管理知识库实现对星地融合网络虚拟化资源池的智能管控与调度, 提供面向业务需求的柔性可重构星地组网, 进而实现天空地海全场景、全业务的服务交付。随着对6G需求和关键技术研究的不深入, 包括星地融合网络的虚拟化、网络功能部署和融合网络切片等问题还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 彭木根, 孙耀华, 王文博. 智简6G无线接入网: 架构、技术和展望[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(3): 1-10.
PENG M G, SUN Y H, WANG W B. Intelligent-concise radio access networks in 6G: architecture, techniques and insight[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(3): 1-10.
- [2] 张彤, 任奕璟, 闫实, 等. 人工智能驱动的6G网络: 智慧内生[J]. 电信科学, 2020, 36(9): 14-22.
ZHANG T, REN Y J, YAN S, et al. Artificial intelligence driven 6G networks: endogenous intelligence[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(9): 14-22.
- [3] 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.
- [4] LIU J J, SHI Y P, FADLULLAH Z M, et al. Space-air-ground integrated network: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 2714-2741.
- [5] 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.
- [6] FANG X R, FENG W, WEI T, et al. 5G embraces satellites for 6G ubiquitous IoT: basic models for integrated satellite terrestrial networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 8596 (99): 1.
- [7] WANG P, ZHANG J X, ZHANG X, et al. Convergence of satellite and terrestrial networks: a comprehensive survey[J]. IEEE Access, 2019(8): 5550-5588.
- [8] ZHANG N, ZHANG S, YANG P, et al. Software defined space-air-ground integrated vehicular networks: challenges and solutions[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(7): 101-109.
- [9] BI Y G, HAN G J, XU S, et al. Software defined space-terrestrial integrated networks: architecture, challenges, and solutions[J]. IEEE Network, 2019, 33(1): 22-28.
- [10] 周洋程, 闫实, 彭木根. 意图驱动的6G无线接入网络[J]. 物联网学报, 2020, 4(1): 72-79.
ZHOU Y C, YAN S, PENG M G. Intent-driven 6G radio access network[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(1): 72-79.
- [11] KATO N, FADLULLAH Z M, TANG F X, et al. Optimizing space-air-ground integrated networks by artificial intelligence[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(4): 140-147.
- [12] BATIR S, HUMANN N, ORTIZ C, et al. Low earth orbit satellites provide continuous enterprise data connectivity[EB]. 2020.
- [13] 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制[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(12): 2503-2509.
ZHANG J L, QIAN H Y, CHENG X, et al. A multi-beam handover mechanism in software-defined satellite network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(12): 2503-2509.
- [14] SUN W C, LIANG J, XIAO N, et al. Intelligent routing scheme for SDN satellite network based on neural network[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019(563): 052087.
- [15] GU R T, QIN J W, DONG T, et al. Recovery routing based on Q-learning for satellite network faults[J]. Complexity, 2020, 2020: 1-13.
- [16] 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.
- [17] 张红旗, 黄睿, 杨英杰, 等. 基于Q-learning的跨域服务链映射机制[J]. 通信学报, 2018, 39(12): 102-112.
ZHANG H Q, HUANG R, YANG Y J, et al. Cross-domain service chain mapping mechanism based on Q-learning[J]. Journal on Communications, 2018, 39(12): 102-112.

- [18] 汪春霆, 翟立君, 徐晓帆. 天地一体化信息网络发展与展望[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 493-504.

WANG C T, ZHAI L J, XU X F. Development and prospects of space-terrestrial integrated information network[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 493-504.

[作者简介]



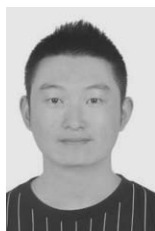
袁硕(1994-), 男, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室博士生, 主要研究方向为星地融合网络和网络智能化。



任奕璟(1996-), 女, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室硕士生, 主要研究方向为雾无线网络的智能资源调配。



王则予(1997-), 女, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室硕士生, 主要研究方向为星地融合网络。



孙耀华(1992-), 男, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室助理研究员, 主要研究方向为 5G 试验平台、人工智能驱动的网络优化。



彭木根(1978-), 男, 博士, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室副主任、教授, 主要研究方向为 6G 无线组网、雾无线网络和智慧物联网等。