

基于 SDN 的铁路系统空天地融合网络架构

滕颖蕾¹, 李鑫¹, 王剑², 蔡伯根², 宋梅¹

(1. 北京邮电大学, 北京 100876; 2. 北京交通大学, 北京 100044)

摘要: 针对列车通信网络制式单一、地理环境差、数据安全可靠传输难以得到保证的现状, 调研铁路系统各业务的通信需求, 提出一种基于软件定义网络 (SDN, software defined network) 和网络功能虚拟化 (NFV, network functions virtualization) 的铁路系统空天地融合网络体系架构。通过集中控制器管理底层铁路系统的物理设施, 实现应用程序与物理基础设施的解耦, 讨论了体系架构的设计细节, 并对架构的协议需求、功能需求以及信息流等展开综述, 给出空天地融合网络与其他单一制式网络覆盖的性能对比分析, 并简要讨论了目前待解决的问题及解决方向。

关键词: 软件定义网络; 网络功能虚拟化; 网络融合; 空天地一体化网络

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00184

SDN enabled space-terrestrial integrated network architecture of railway system

TENG Yinglei¹, LI Xin¹, WANG Jian², CAI Bogen², SONG Mei¹

1. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract: In view of the current situation that it is difficult to guarantee the safe and reliable transmission of data with the poor geographical environment in the single standard train communication network, the communication needs of each business of the railway system were investigated and a space-terrestrial integrated network architecture based on software defined network (SDN) and network functions virtualization (NFV) was proposed. By focusing on the controller to manage the physical facilities, the architecture realized decoupling application and physical infrastructure. The design of the architectural details and the requirements of the agreement for the architecture in the functional requirements and the information flow were discussed. In the end, the performance comparison between the space-terrestrial integrated network and other single-system network coverage was given, problems remaining to be solved and some feasible solutions faced by the space-terrestrial integrated network were briefly discussed.

Key words: software defined network (SDN), network functions virtualization (NFV), network convergence, space-terrestrial integrated network

1 引言

我国经济水平的迅速提升, 推动着铁路交通行业的快速发展。截至 2019 年年底, 我国铁路通车

总里程为 139 000 km, 位列世界第二, 预计到 2020 年年底, 我国铁路运营里程将达 146 000 km^[1]。然而, 我国西部偏远地区目前已有的通信制式单一、输电线路规模巨大、维护手段落后, 如何在自然环境恶劣

收稿日期: 2020-06-14; 修回日期: 2020-08-06

通信作者: 滕颖蕾, lilytengt@bupt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2018YFB1201500); 北京市自然科学基金资助项目 (No.L171011); 中国铁路总公司科技研究开发计划 (No.J2018G004)

Foundation Items: The National Key R&D Program of China (No.2018YFB1201500), The Beijing Natural Science Foundation (No. L171011), The Research and Development Plan of China Railway Corporation (No.J2018G004)

劣、通信基础设施不完善的条件下, 处理复杂的列车通信业务, 保证数据低时延、高可靠性传输, 实现对铁路运行环境的及时监测和诊断成为目前亟待解决的问题之一。

为了提高通信系统的稳健性、可靠性和安全性, 相关研究人员考虑引入异构网络融合技术。如意大利安萨尔多公司提出了卫星通信、2G/3G 和泛欧集群无线电 (TETRA, trans European trunked radio) 等多模网络融合的车—地通信方式, 并在意大利撒丁岛的一条铁路线上进行了初步测试验证^[2]。作为一种通用、开放的网络结构, 在异构的网络环境中, 网络融合技术可提供统一的业务保障, 但复杂的基础结构、动态的网络拓扑结构以及不稳定的连接, 使得融合过程面临巨大挑战, 如高误码率、高传输时延、间歇性连接、移动性管理困难以及资源利用率低等^[3]。

下一代无线网络将是无线个域网 (如 bluetooth)、无线局域网 (如 Wi-Fi)、无线城域网 (如 WiMAX)、公共移动通信网 (如 4G、5G) 以及 Ad-Hoc 网络等多种接入网相互融合的异构无线网络^[4]。近年来, 人们为实现异构网络融合提出了多种解决方案。一般来说, 异构网络融合结构主要分为紧耦合结构和松耦合结构。紧耦合是指将一个异构网络视为另一个网络的子网络, 结构设计和实现较困难。松耦合是指通过多种网络协议的转换 (网关设备) 实现异构网络之间的互联互通, 其独立的管理方案和较低的维护难度使得松耦合成为目前应用较广泛的网络融合结构^[5]。针对基于协议转换的异构网络融合, 提出两种方案: 1) 传统的基于媒体访问控制 (MAC, media access control) 层协议的网络融合, 实现以太网技术和非以太网技术的统一; 2) 基于网际互连协议 (IP, Internet protocol) 层协议的融合, 屏蔽接入网络类型的差异性, 在 IP 平面上同时承载控制信令和数据流, 目前基于 IP 协议的融合已成为异构融合网络的一种主要组网方式。然而大量的研究结果和实验结果显示, 仅考虑上述方案仍不能完全解决异构网络融合的跨度大、切换频繁、多协议并存等问题。

作为一种新型的、实现控制面与数据面分离的网络技术, SDN 通过部署中心控制器, 进而利用链路发现协议获取全局的网络状态视图, 通过南、北向开放型接口将应用层请求转化到网络设备, 以集中的方式进行数据流管理, 在逻辑集中控制器上实

现转发节点的控制逻辑, 从根本上提高了资源管理和调度能力, 保证了网络环境的强适应性和高效可靠。而 NFV 通过将硬件功能抽象成处理器中运行的软件, 实现了网络功能的灵活动态部署。本文将 SDN、NFV 以及移动边缘计算 (MEC, mobile edge computing) 技术引入以 IP 网络为核心的空天地一体化网络体系, 在数据层面上针对异构多模网络的分布特点进行有效覆盖补充, 同时完成对数据的高效处理、存储和转发; 在控制层面上, 中心控制器通过综合考虑网络动态拓扑结构、单个网络元素的状态以及通信链路的占用情况, 做出相关网络决策, 实现高效、可靠的网络资源管理, 有效引导数据传输, 同时加强可靠性并增加安全加密机制, 提升铁路通信系统的可靠性和安全性。

本文首先梳理空天地融合网络的研究现状, 指出发展趋势, 其次分析铁路通信系统中各业务的通信需求, 然后介绍基于 SDN 的铁路系统空天地网络融合体系架构, 并对架构中的功能需求、协议需求、信息流、关键性技术以及重要性能逐一展开介绍, 最后对文章进行总结概述。

2 空天地融合网络研究现状

2.1 空天地融合网络

随着卫星与航天通信的逐步发展, 空天地融合网络以地面网络为基础, 融合了空基、天基等一系列多模网络, 构成无缝连接的一体化网络, 充分利用各网络的优势实现了信息的高速传输, 是目前发展的重点。

为了实现空间信息的融合, 美国于 1999 年提出全球信息栅格 (GIG, Global Information Grid) 作为空天地全球通信设施, GIG 包含全球应用层、计算设施层、通信设施层以及基础层 4 个层面, 其通信设施层由 IP 协议融合空基和地基等多种异构网络, 并在计算设施层中引入虚拟化实现黑盒加密通信^[6-7]。2004 年, 美国首次实施转型卫星通信系统 (TSAT, Transformational Satellite Communication System)^[8], 形成由 5 颗地球卫星和地面网关组成的空间骨干网, 提供覆盖全球的高保密、高容量的通信系统, 同时能适应其他军用通信系统的部署。2005 年 7 月, 由欧洲卫星通信领域各方组成的 ISI (Integral Satcom Initiative) 技术联盟组织成立, 并于 2007 年提出全球通信一体化的空间基础设施 (ISICOM, Integrates Space Infrastructure for Global

Communication)^[9]。该体系结构包括 3 颗核心地球卫星和由各种节点组成的空间及地面组件,与 TSAT 类似, ISICOM 侧重于融合卫星系统,旨在提供应急减灾管理。同年,美国国家航空航天局(NASA, National Aeronautics and Space Administration)制定了空间通信与导航(SCaN, Space Communication and Navigation)体系结构发展计划,计划在 2030 年之前建立空间一体化信息传输网络,形成深空网络子系统、近地网络子系统和空间网络子系统 3 部分的融合系统,实现太阳系内的通信、导航和测试控制功能^[10]。2010 年年初,谷歌公司联合汇丰银行与欧洲有线电子运营商 Liberty Global 发起“其他 30 亿”(O3b, Other 3 Billion)计划,计划发射多颗中轨道地球卫星(MEO, medium orbit earth satellite)为另外 30 亿不能上网的人们提供网络覆盖。2013 年,谷歌公司宣布“潜鸟计划”,用热气球连接整个互联网,并且已在新西兰展开实验,主要为偏远农村提供漫游服务。2015 年,谷歌公司借助太空探索技术公司 SpaceX 发射的成像卫星为谷歌地球提供卫星图像,同时计划打造一张由 4 000 颗卫星组成的太空互联网^[11]。

2017 年,第三代合作伙伴计划(3GPP, 3rd Generation Partnership Project)在 5G 标准中探讨卫星、飞行器等相关网络应用,初步确定与空天地融合网络相关的 3 个应用场景,即商用空对地部署场景、轻型飞行器场景和卫星—地面场景,可提供大于 100 km 的区域覆盖范围,支持基本数据语音服务及设备通信,主要应用于用户吞吐量中等和用户密度较低的场景,为高速、高海拔的移动用户提供服务,有效补充了地面网络的覆盖范围^[12]。2017 年 3 月,3GPP RAN1 提出非地面网络信道模型和相关架构,目前处于标准更新阶段;同年 9 月,3GPP SA1 开始研究并定义融合卫星接入的 5G 系统的相关需求,支持卫星接入的用户需求。地面网络与天基、空基网络相互融合,共同构成全球覆盖的空天地一体化网络,是未来通信发展的重要方向之一。目前,我国已拥有数百颗卫星,包括北斗三号导航定位系统和专用对地观测卫星星座。2018 年,我国探讨了以天智一号卫星为代表的新一代软件定义实验平台。同时,我国科技创新 2030 重点项目“天地一体化信息网络递归接入网”正在规划实施,预计可支持定位导航、应急救援、空间探索等大量业务^[13]。2019 年,6G 白皮书《6G 无线智能世界的关键驱动

和研究挑战》表明,未来 6G 会突破地基网络的限制,实现地基、空基、天基以及海洋通信网络无缝覆盖。同年 11 月,我国成立了国家 6G 技术研发专家组,正式开启 6G 空天地一体化通信网络的研发工作^[14]。

2.2 基于 SDN 的空天地融合网络

近年来,随着 SDN 技术在数据中心网络^[15]、接入网^[16]、C-RAN 网络等多个典型融合网络中的应用,我国第一个空间路由器 YH-6006 成功实现软件定义的空间网络测试,大幅度拓宽了设计空天地网络融合架构的思路。Li 等^[17]提出了基于 SDN 和 NFV 的空天地一体化网络架构,实现了灵活的卫星网络流量工程和细粒度的服务质量(QoS, quality of service)保证,并且给出了基于时延容错网络(DTN, delay tolerant network)和 OpenFlow 的系统实现过程。Shi 等^[18]提出了跨域 SDN 架构 MLSTIN,该架构主要划分为卫星、空中和陆地域,讨论并分析了架构的设计和实现细节,通过实例验证该体系结构能够显著提高配置更新和决策的效率。Chien 等^[19]根据物联网的发展趋势提出了一个由卫星网络、骨干网组成的 H-STIN 架构,并讨论了 H-STIN 在路由集成和资源配置方面所面临的主要挑战,通过制定 H-STIN 标准,在多种场景下实现高效资源配置。Sharma 等^[20]提出了一种使用区块链技术的分布式 SDN 架构 DistBlockNet,其数据转发平面主要由区块链技术产生的分布式对等网络构成,在没有可信中介的情况下彼此交互。Sun 等^[21]利用 SDN 和 MEC 技术提出了一个集成空间和地面网络组件的复合体系结构,提高了网络灵活性和服务质量,讨论了针对移动管理、资源管理、路由、流量控制、安全等问题的潜在解决方案。

在现有通信网络分布条件的基础上,本文提出基于 SDN 的铁路系统空天地全 IP 融合网络架构,通过透明的 IP 转换,利用地面蜂窝网络低时延、大带宽的优势以及卫星网络广覆盖的特点,实现不受地理环境限制的远距离覆盖。该架构支持多种接入技术,协调各异构网络实体资源,实时监控各通信链路的状态,更好地支持复杂多变的铁路通信任务,考虑轨道沿线场景及各类通信业务的需求,利用 MEC 技术等接入网边缘设置服务器,提供合适的计算资源和就近服务能力,实现数据处理和存储,有效实现了云端的数据共享,铁路运营控制中心(OCC, operating control center)参考上述数据完

成列车即时的运营调度和列车状态监测。

3 基于SDN的空天地融合网络架构

3.1 铁路系统相关业务的通信需求

铁路通信业务需求如表1所示,根据目前铁路通信业务的性能、安全等级,从吞吐量、传输时延、分组丢失率、可靠性、安全性等多方面讨论铁路通信业务需求,主要分析如下。

1) 对于列车安全预警、应急通信、列车安全视频监控等业务,这些业务与行车安全、人员生命财产安全以及应对各类突发状况的能力密切相关,需要满足其高优先级、低时延及低分组丢失率的要求,其传输类型包括监控视频、语音等信息^[22]。

2) 列控系统是指铁路OCC根据列车当前所处环境和终端相关设备的状态信息以及车一地、车一车的位置数据信息,对列车控制室发出的即时调度指令。其优先级、实时性、可靠性等要求高,主要传输控制信令,属于多包小数据传输,仅能容忍少量冗余数据的丢失,以防做出错误的决策判断。

3) 自动驾驶实现了在无人监督的情况下自动控制列车运行的方向和速度,要求其能在系统发生故障和性能下降时及时发现并生成应对措施,自动调整切换成列车安全驾驶状态,远距离的自动驾驶技术的安全性和稳定性正在验证和改善中^[22]。目前,自动驾驶技术主要应用于短距离的列车行驶过程,列车需实时自动监控各设备的状态,参考铁路OCC的相关控制运行指令及邻车运行状态,做出响应或控制,实现列车运行速度、方向等参数的自动调整。其对数据分组丢失率的要求较高,时延应该降低至 1ms ^[23]的数量级。

4) 关于列车状态检测和远程故障诊断工作,铁路物联网技术当前主要应用于列车各部件的状态

检测、智能识别监控与故障诊断等铁路维护工作,根据特定的标准检测其是否达到预先确定的维护目标。该工作有助于保持远程站点对列车的维护进程,实现了列车在其生命周期内的良好运营,因此,对实时性、可靠性和安全性的要求较高。

3.2 基于SDN的铁路系统空天地网络融合架构

依据上述铁路通信业务的需求分析,目前基于3GPP长期演进铁路(LTE-R, long-term evolution-railway)的铁路通信系统存在很多不足,这些不足将会严重影响铁路通信业务的安全性、可靠性以及稳定性。首先,LTE-R网络覆盖情况复杂、运维难度大、网络优化困难,主要是因为LTE-R网络受地形影响严重,如山区对通信信号阻隔较严重,并且部署的天线易受天气影响导致弱覆盖和越区覆盖等问题。而LTE-R承载了应急通信、列控调度、语言通信等大量重要业务,因此,运维人员需要及时获取网络数据,发现定位并现场处理潜在的网络问题。其次,LTE-R的带宽有限,随着列车通信设备数量的增加,LTE-R将难以承载大量设备通信,很难为每个设备提供有效且稳定的接入,将会导致部分设备处于离线状态。最后,LTE-R无线网络的小区覆盖范围较小,随着列车的高速运行,车一车、车一地之间的通信链路需要进行频繁地小区间切换,且容易受地面的干扰与挟持攻击,难以保证通信链路的安全性。

为了解决上述问题,许多关键技术相继被提出。如SDN技术,SDN负责分离LTE-R中各个网络节点的控制面和数据面,然而对于LTE-R的通信系统而言,只缓解了部分运维压力,如在当前节点检测出现问题的情况下,通过控制器下发流表信息,实施切换,保证数据链路的连通性。然而,控制面是基于软件的,一般来说基于软件的消息处理

表1 铁路通信业务需求^[22]

应用业务	吞吐量	传输时延/ms	分组丢失率	优先级	实时性	可靠性	安全等级
列车安全预警	小	50	10^{-6}	1	高	高	高
应急通信	较大	100	10^{-6}	1	很高	很高	高
列车安全视频监控	大	150	10^{-3}	3	高	高	一般
语音通信	较大	100	10^{-3}	3	较高	高	高
列控系统	较大	≤ 10	10^{-5}	1	很高	很高	高
自动驾驶	大	≤ 6	10^{-9}	1	很高	很高	高
状态监测与远程故障诊断	较大	50	10^{-6}	1	很高	较高	高

时长比基于硬件的消息处理时长多约 10 倍，随着网络节点数量的增加，消息队列也不断增加，导致出现时延方面的问题。

因此，提出了一种新的网络架构，基于 SDN 的铁路系统空地融合网络架构如图 1 所示。与单一的 LTE-R 通信系统不同，该架构另外引入了空基网络、天基网络、Wi-Fi 和公网，总体架构可分为 4 层，包括数据层、控制层、虚拟网络层和业务层。

首先，根据铁路沿线的各网络分布特点、地理条件限制以及数据的不均衡性，考虑将轨道沿线区域主要分为 3 类场景：1) 交通枢纽地带，主要通过专网完成数据通信；2) 西部偏远地区，采用天基网络、空基网络、专网、公网和 Wi-Fi 等多模融合网络保证西部偏远地区的铁路沿线得到有效覆盖，确保数据互联互通以及超可靠传输；3) 城市边缘地区，采用专网和公网互补完成通信。同时针对不同

场景，可通过控制器动态地实现自定义配置以满足业务需求。

作为整个架构的基础设施，数据层主要由传感器平台、网络节点和计算存储节点等硬件物理实体资源构成。传感器平台主要包括地面传感器、列车传感器以及空间传感器；网络节点包括无人机、飞艇、卫星、地面基站以及交换机路由器；针对控制面中消息处理时延较大的情况，考虑引入计算存储节点，主要指位于各接入网络边缘的 MEC 服务器，主要完成 IP 融合网络中数据信息的收集、处理、压缩存储和转发。其中，数据信息主要包括网络设备状态信息、终端接入检测信息、传输数据信息、相关通信质量信息以及各传感器感知信息。同时利用 MEC 技术将各网络中的计算平台从核心网转移到接入网边缘，提高对数据的计算处理效率，通过应用程序编程接口（API, application programming

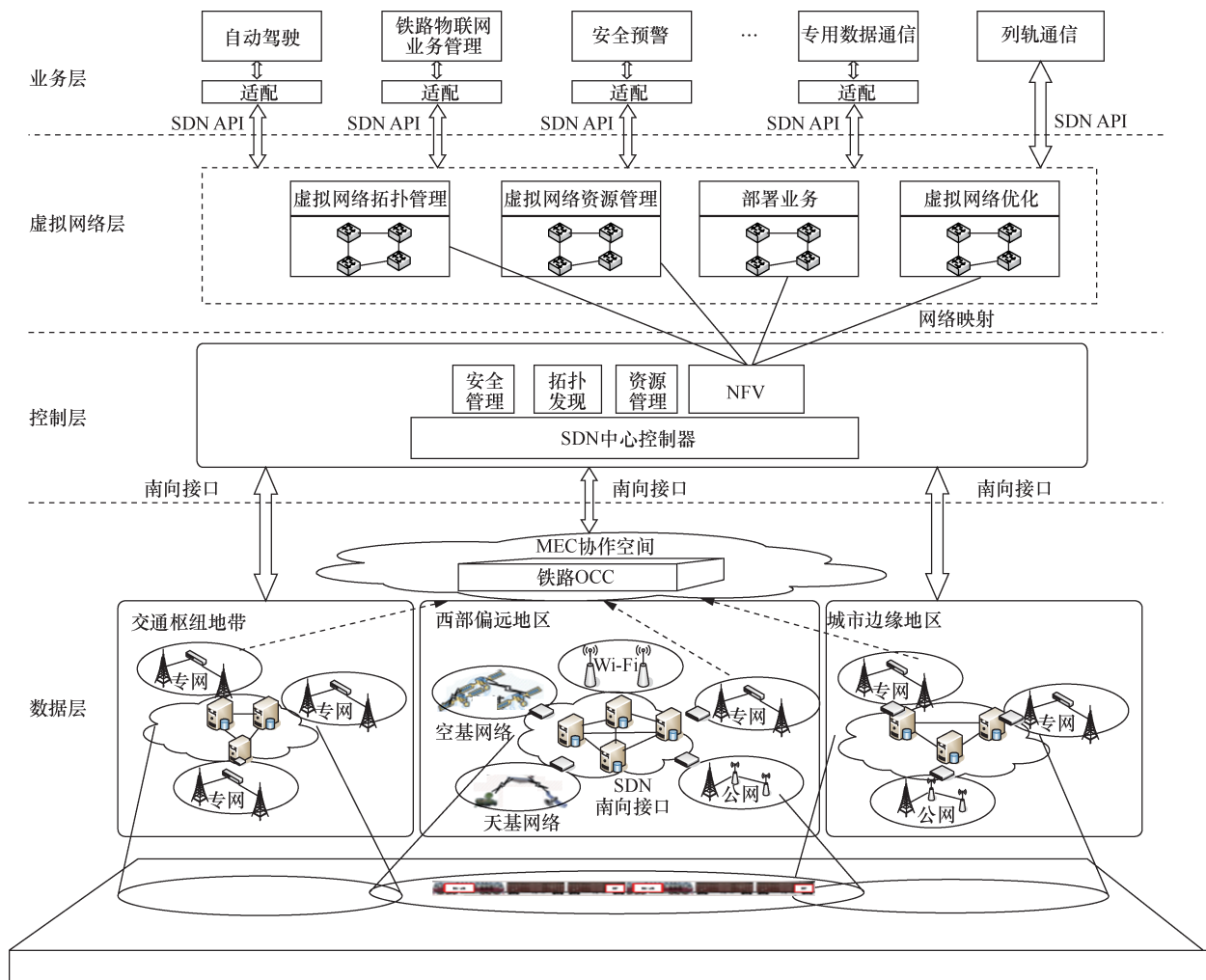


图 1 基于 SDN 的铁路系统空地融合网络架构

interface) 实现无线网络及服务器的信息交互, 适应日益增长的网络规模和业务相关的需求, 同时向铁路 OCC 提供相关信息。

控制层主要完成网络安全管理、拓扑发现、资源管理以及 NFV 等功能。SDN 中心控制器驱动架构底层各设备与功能的运行, 针对网络规模的大小, 可考虑采用多个控制器协作构成中心控制器, 提高资源的分配效率。SDN 中心控制器通过南向接口管理数据层物理设备, 获取数据层上传的设备信息、流表记录以及链路状态, 存放至网络信息数据库, 与网络交互产生拓扑映射网络模型, 通过北向接口向业务层的应用程序提供数据采集、传输和处理服务。综合上述信息及时做出相关决策, 向数据层路由下发流表信息, 控制数据流向。

虚拟网络层由控制层通过网络虚拟化功能抽象得到, 主要功能是实现铁路通信网络多功能的独立运行。考虑针对不同类型的网络业务, 构建相互隔离的网络拓扑, 使不同业务在独立的虚拟网络中进行开发和部署。

业务层可以根据通信业务的相关需求, 在不改变底层物理设备的前提下, 在虚拟网络上实现轨道通信系统各种业务和网络管理功能, 如自动驾驶、铁路物联网业务管理、安全预警等, 从而通过控制层下发控制指令指导底层设备, 更好地支持不同的铁路系统的业务。

不同于传统的 SDN 架构, 本架构主要有以下特点。1) 传统的 SDN 一般应用于地面单一网络, 本文将 SDN 应用于空天地多模网络, 根据铁路沿线网络分布的差异性实现了对 LTE-R 的适当补充, 保障了数据的超可靠传输。2) 在接入网边缘部署多个 MEC 服务器, 实现 MEC 雾协同管理, 并与铁路 OCC 共享数据。一方面, 将核心网数据处理的压力转移到接入网边缘; 另一方面, 通过消息数据的提前压缩处理, 在一定程度上减小了控制面的消息处理时长, 从而减小了系统时延。3) 在控制层增加可靠性和安全管理机制, 通过对拓扑的编排和优化以及对下发流表信息、控制信令等消息的随机加密等方法, 满足了铁路通信系统的高可靠性和安全性需求, 提升了对各类业务的支持能力。

3.3 协议需求

基于 SDN 的空天地融合网络中的通信协议是铁路终端与 IP 多模融合网络完成通信或服务必须遵循的规则, 一般来说, 主要分为两类协议, 一类

是主要负责铁路终端设备间通信的传输协议, 另一类是负责铁路终端与接入网数据交换和控制信令接收的协议, 是主要运行在传输控制协议/互联网协议 (TCP/IP, transmission control protocol/Internet protocol) 下的通信协议。本节主要讨论列车与接入网之间的通信协议, 为了保障列车相关数据的高效、可靠传输, 通信协议需要满足以下 5 点需求。

1) 安全性

空天地一体化网络作为一种分布式的网络架构, 各个节点独立运行, 容易被监听和破坏。应在网络中加入安全检测以及加密机制, 保证控制器与交换机之间建立安全连接, 确保数据传输和控制信令下发的安全性。

2) 可靠性

列车终端与网络之间需要保证数据传输的可靠性和稳定性, 当终端和网络之间需要通信时, 列车终端通过网络发送接入请求, 通过 SDN 中心控制器集中化的路径计算模块, 确定相关的网络条件以及设备状态约束, 建立对比模型, 分析得到最优化的传输路径进行接入或切换。并由 SDN 中心控制器产生更新下发相关路由的流表信息, 通过查询流表信息进行路由选择, 实现数据分组的传输, 建立可靠性连接, 多次确认数据分组的序列号, 保证流表项及数据分组信息传输的完整性。

3) 移动性

在基于 SDN 的铁路系统空天地融合网络架构中, 以卫星为主的空网络节点的位置不断做出相对改变, 造成网络拓扑不断改变。因此, 要求接入协议能够准确感知由网络节点移动造成的链路通断, 路由协议根据链路状态的变化修改自身的路由表, 同时需要及时查询造成的数据丢失, 及时启动重传措施^[24]。

4) 互操作性

SDN 中心控制器通过北向 API 适配与应用层的实时连接, 目前考虑的协议主要有简单网络管理协议 (SNMP, simple network management protocol)^[25]和人机交互协议^[26]等。与人工智能结合, 检测匹配列车终端上传的通信环境, 及时发现通信网络中出现的故障并触发自治愈合流程, 进行网络补偿修复, 保障列控通信系统的可靠运行, 可以根据列控系统自身的需求灵活地控制网络。

5) 可扩展性

当空天地一体化网络中加入新的、适用于特定

场景/用途的网络时，需要能够有机地融合各网络，实现各网络的互联互通，同时充分利用每个网络的优势，完成网络的优化部署^[27]。

基于 SDN 的空天地一体化网络架构通过透明的协议转换，集成了铁路无线接入网络、公共蜂窝网络、卫星移动通信网络以及临近空间通信网络等多种类型的网络，有效支持高速数据传输、存储以及处理和分析，实现了资源的高效利用，提高了系统的 QoS 水平。

3.4 功能需求

基于 SDN 的铁路系统空天地一体化网络功能架构如图 2 所示，各异构通信网络构成数据层，完成数据处理、转发等功能，业务层通过虚拟网络层对虚拟网络进行多功能切片，由控制层下达控制信令，完成各网络的配置，控制数据的流向。

1) 环境感知与数据收集

针对多维的复杂网络场景，考虑对网络资源的有效分配，完成网络模式的切换，保证列车安全运行。在网络侧和终端侧配置基于情景智能感知的网络智能配置框架和感知平台，收集大量网络环境数据，系统通过分析数据从而具备对环境进行自主判断的能力，指导列车网络模式的切换，使列车能够实现高效、可靠的通信和运行。

2) 数据转发、终端接入检测与控制

在车载移动终端与无线多模融合网络之间设置接入管理，较简单的接入方式包括列车直接与地面蜂窝基站建立连接、空基和天基等其他网络模式的接入。在多模接口侧进行安全检测，使得车载移动终端感知的数据可以安全通过多模网络相互转发共享，最后导入至 SDN 中心控制器的数据库，防止攻击者通过安全防护比较薄弱的终端层向核心网络发起攻击。

3) 数据融合、处理与上传

通信数据是铁路通信系统的基础，其完备性与列车运行状态密切相关，利用列车移动终端多个传感器获取关于列车设备的全面信息。网关中的 MEC 服务器可以实现对数据的初步融合、计算与处理，在很大程度上提高了通信效率^[28]。

4) 网络自治

根据铁路各终端上报的网络通信质量信息进行实时评估，结合大数据分析和预测技术制定多属性接入决策，对网络质量恶化速率较快的区间提前进行网络中断补偿。同时，提前进行通信模式的预切换工作，包含相关通信系统参数的调整、网络资源的迁移和预分配等前期措施。

5) 网络优化

虚拟网络层通过深度包检测功能实现对业务

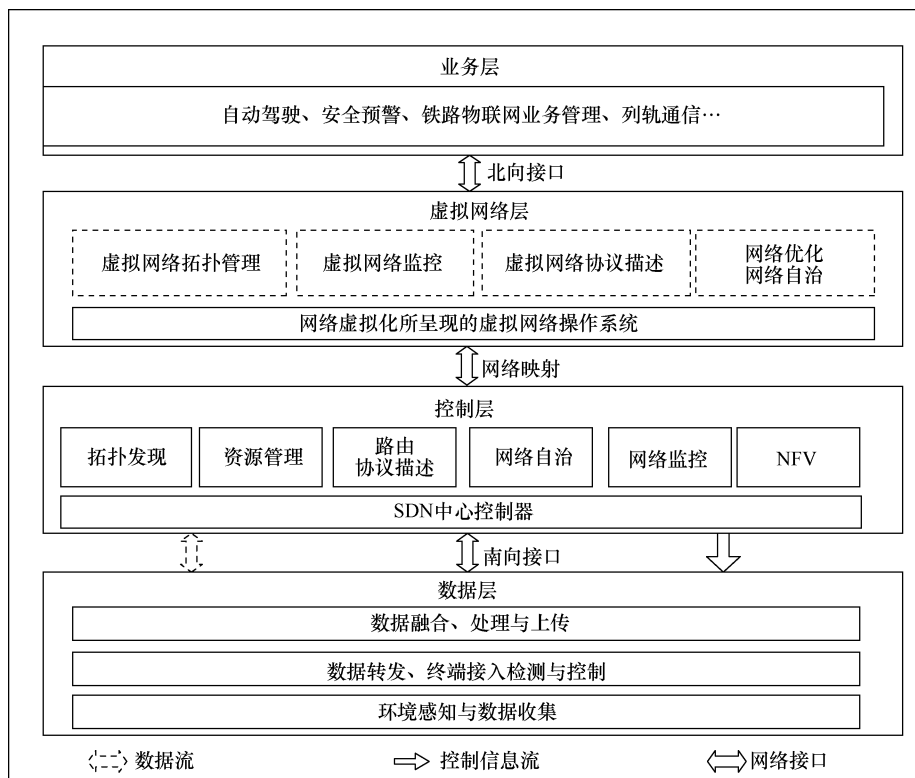


图 2 基于 SDN 的铁路系统空天地一体化网络功能架构

流的分类，通过动态流表控制功能实现对不同类型业务流的区分化路由转发。SDN中心控制器根据列车上报的网络通信质量信息制定相关的优化策略，充分利用全局资源，提高架构服务水平^[29]。

3.5 信息流

基于SDN的铁路系统空天地融合网络的信息流如图3所示。考虑多种信息网络多样性、动态性、异构性等特点，基于SDN的空天地的多模全IP通信网络从垂直体系架构角度可分为控制层、网络层、终端层3层。总体信息流主要分为两类，具体如下。

1) 数据流

终端层列车感知的路况信息、车一车交互状态、列车内部各装置的运行状态、车载状态、列车安全视频监控信息、通信质量信息等通过数据流经IP融合网络以及服务器共享至SDN中心控制器中的数据库。另外，各网络运行状态以及网络之间的通信状态也通过数据流共享至SDN中心控制器中的数据库，数据可以在控制层、网络层和终端层相互交换。

2) 控制信息流

SDN中心控制器获取全面的数据信息后，通过SDN中心控制器南向接口向IP多模网络发送控制信令，进行流表控制和链路选择，从而有效地协调资源分配，实现链路利用最大化。另外，控制器还

可以直接向列车终端相关通信设施发送控制信令，控制其通断，控制信息流均从控制层发送至网络层或终端层。

4 性能分析

本文提出的基于SDN的空天地一体化网络架构综合了各网络的优势，为列车提供大覆盖通信网络的同时，有效保证了通信链路的稳定性、安全性和可靠性。目前，铁路通信可用的网络资源包括铁路无线接入网络、公共蜂窝网络、卫星移动通信网络以及临近空间通信网络，空天地一体化性能分析如图4所示，本文分别从带宽、时延、数据传输速率、覆盖范围、移动性支持、安全性、稳定性和可靠性8个方面对空天地融合网络和各独立网络进行对比分析。

1) 带宽方面

卫星通信信道处于微波频率范围，如C频段(4~8 GHz)、Ku频段(10~18 GHz)和Ka频段(18~31 GHz)^[30]，频率资源较丰富，并且支持频率范围的不断扩展。目前，公共蜂窝网络和铁路无线接入网络局限于规定频带内，无法进行有效扩展。5G可以通过向毫米波频段转移和利用Wi-Fi 5 GHz的非授权频带增加带宽^[31]，从而有效提升数据传输速率。用于地面蜂窝网络的多入多出(MIMO, multi input multi output)技术也可用于卫星网络上，

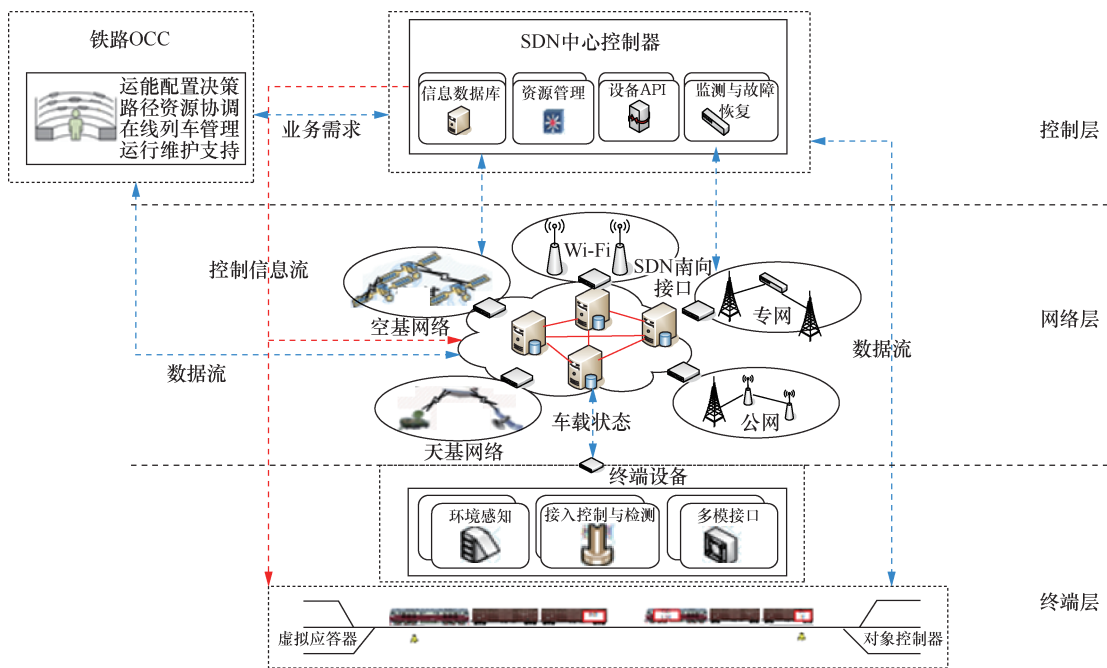


图3 基于SDN的铁路系统空天地融合网络的信息流

增加了卫星网络的数据传输速率和可靠性。空天地一体化融合网络可以选择性地利用多个网络的有效频段,通过 SDN 中心控制器的动态流表控制功能,实现对分类业务流的区分化路由或频段转发。

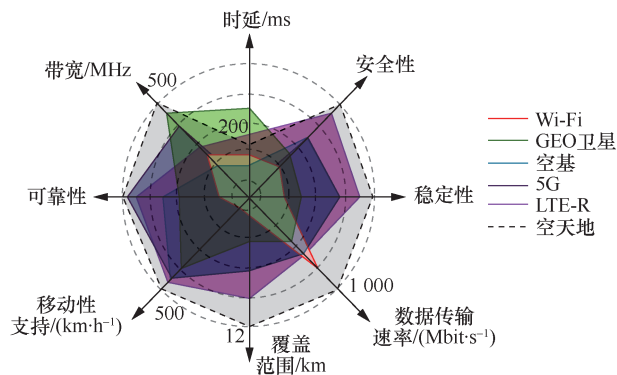


图 4 空天地一体化性能分析

2) 时延方面

考虑异构网络间的切换问题,从理论上讲,空天地一体化融合网络的时延相较于各独立网络的时延有所增加。通常来讲,切换主要分为两类,一类是发生在同种网络之间的水平切换,另一类是发生在异构网络之间的垂直切换,垂直切换由于网间协议不同,所以更复杂。针对水平切换,快速移动互联网协议第 6 版(IPv6, Internet protocol version 6)中有两种切换流程,即反应式切换和预测式切换。反应式切换的时延比预测式切换的时延大,为了更好地优化切换性能^[32],需要通过引入切换预测模块减小切换时延。针对垂直切换,通过改进切换触发和判决流程,如边判决边切换等方法,提前触发切换流程,减小切换时延。

3) 覆盖范围方面

Wi-Fi 的覆盖范围主要受路由器发射功率的制约,覆盖范围较小,覆盖半径约为 100 m。同步地球轨道卫星(GEO, geosynchronous earth orbit)所在的轨道高度为 36 000 km,覆盖范围约为地球表面积的 1/3,3 颗等距分布的 GEO 即可覆盖全球。而飞行器的覆盖范围主要与其飞行高度有关,其覆盖半径平均可达 10 km。相比于 LTE-R,5G 的电磁波频率高、波长短、衰减更快,平均覆盖半径为 1 km,不足 LTE-R 覆盖范围的一半,因此目前我国正在逐步增加 5G 基站的数量,增加 5G 的覆盖面。

4) 数据传输速率以及移动性支持方面

Wi-Fi 作为无线局域网技术,在列车定点静止或低速时可提供高达 54 Mbit/s 的数据传输速率^[33],

但 Wi-Fi 的突出问题是易受其他系统的干扰,通信质量难以得到保证,对移动性支持较差。空基网络可提供较大的覆盖范围,但其转发节点的动态移动使得链路时延和带宽发生动态变化,产生更多的时延和带宽消耗。LTE-R 在 GSM-R 的基础上,以云计算和大数据应用为前提^[34],具有固定且信道容量大、频谱利用率高等特点,可在列车运行过程中提供大于 10 Mbit/s 的传输速率,满足多用户、高速率的铁路数据通信需求。

5) 安全性方面

卫星及飞行器等空基网络具有高动态性、高误码率、大传输时延和有限的通信容量等特点,不同 GEO 卫星、公共蜂窝网络、临近空间网络、列车终端之间的相对位置在不断变化。因此,在基于 SDN 的空天地一体化架构中,控制器频繁地向各网络节点下发最新流表,更新数据的流向,使得攻击者在短时间内无法判定该网络节点是否有数据流。

6) 稳定性与可靠性方面

列控通信系统存在大量的视频、语音等数据信息以及链路调度相关的控制信令,单一的铁路无线接入网络受带宽、时延和覆盖范围的限制,难以保证融合信息的高速、稳定传输。另外,卫星、飞行器等通信网络易受恶劣天气的影响,造成网络质量的快速下降。空天地融合网络采用多网融合方式,利用 SDN 中心控制器为不同的需求提供匹配资源,并为数据分配最优和次优的传输链路。当网络发生意外中断时,及时进行调度并分配闲置网络资源,启动补偿方案,时刻保证列控通信系统的稳定性和可靠性。

此外,通过实验仿真验证了空天地融合网络覆盖下的通信链路可靠性。首先,通过三维齐次泊松点过程(HPPP, homogeneous Poisson point process)模拟空间中低轨卫星的分布,通过二维 HPPP 模拟地面基站的分布。在 HPPP 模型中,各网络站点分布趋于随机化,站点之间相对独立,新接入的站点或用户对整体网络架构的影响较小,较接近实际网络。中断概率性能比较结果如图 5 所示,图 5(a)展示了空天地融合网络、单卫星网络和地面网络静态场景下的覆盖性能对比,根据铁路通信业务的差异性匹配对应的信噪比(SINR, signal to interference plus noise ratio),随着 SINR 阈值的逐渐增大,即业务对通信链路可靠性的要求逐渐提高,明显地看到与其他单网相比,空天地融合网络对应的链路中断

概率最小。图 5(b)展示了随着融合网络中卫星节点的增加（卫星密度的增大），其提供的链路可靠性也逐渐提高。

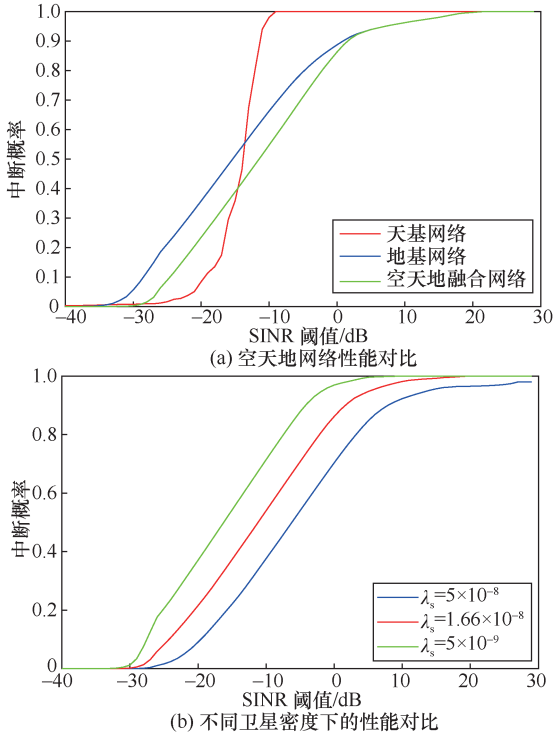


图5 中断概率性能比较结果

综上所述，空天地融合网络通过融合多种通信制式，充分利用现有的网络资源，随着网络节点数量的增加，理论上可以取得更大的覆盖区域、更高的数据传输速率、更好的移动性支持、更强的安全性和可靠性等，形成铁路无线接入网络、公共蜂窝网络、卫星移动通信网络以及临近空间通信等多网络共存的局面，有效弥补了铁路无线接入网络在覆盖范围、移动性管理、通信时延等方面的不足。当多种通信方式并存时，面对不同的铁路数据网业务需求，如何进行有效的网络选择和切换是提升网络性能的关键，但由于网络规模、异构性差异和网络拓扑动态变化等问题，移动性管理、资源管理和安全性等方面面临着技术挑战。

5 挑战

由于列车处于高速运行状态，而且信道环境恶劣，难以满足对安全性、可靠性、稳健性的要求，本节主要叙述了基于 SDN 的铁路系统空天地融合网络架构中安全保障、移动性管理和无线资源管理等方面存在的问题和挑战。

1) 环境复杂，安全保障难度大

在空天地一体化网络中，以卫星网络为主的空基网络地理覆盖面积大、通信成本较高。在基于 SDN 的空天地一体化网络架构中，转发设备频繁地与 SDN 中心控制器连接/断开，在实施网络切换的过程中，信令信息可能会被伪造、加密和窃听^[35]。为了保证切换的稳健性，需要考虑增加具有加密数字签名功能的高效切换或物理层安全措施，但由于卫星网络节点的复杂性和多变性，建立卫星网络安全密钥管理系统和路由层面的分布式信任模型是一项很艰巨的任务^[36-37]。

2) 移动性管理

在空天地融合网络中，列车移动终端和低轨道地球卫星时刻以相对不同的速度和方向进行移动，导致了频繁切换问题。同时，由于异构网络之间的移动性差异，导致不同网络拓扑的变化规律不同。另外，为了维护正在进行的数据传输的完整性和稳定性，保证切换过程中的低切换时延、接近于零的切换失败率和分组丢失率，整合终端/网络多节点的移动特征与网络策略等信息，做出多属性最优网络切换决策成为目前需要考虑的主要问题。

3) 无线资源管理问题

为了解决铁路通信网络系统中各系统之间互通、融合的问题，如何高效管理底层异构资源成为制约网络性能的主要问题^[38]。本文所提出的架构引入 NFV 技术，通过资源抽象整合不同特性的频谱、信道等资源，构建多维的空间—地面综合性虚拟资源，考虑多维信息的瞬时性、周期性，设计一种基于时变网络的灵活、动态的统一资源分类和分配策略成为目前的难点。

4) 边缘智能计算

铁路通信系统存在大量低时延、高可靠性要求的业务，随着铁路系统中物联网设备和网络节点数量的不断增加，控制面对大规模网络做出决策的时间也在不断增加，导致部分业务无法成功进行。本文所提出的架构在接入网的边缘引入 MEC 服务器进行数据处理和计算^[39]，主要依赖于控制层针对整体网络拓扑和数据做出决策，为了进一步减小系统时延，考虑让边缘节点都具有一定的智能决策能力，借助轻量可部署、便捷的人工智能算法，减小控制层的负荷，提高通信效率，满足实时业务的需求。

6 结束语

本文提出了一种基于 SDN 的铁路系统空天地一体化网络架构,该架构利用 IP 技术,实现了空基、地基、地基网络等多模网络的有效融合,采用 SDN 技术实现数据平面和控制平面的分离,实现了数据平面上的高度可编程。另外,利用 NFV 技术抽象出虚拟网络相关的拓扑和资源,为铁路通信系统中不同类型的业务提供功能管理控制,提高了业务类型的可拓展性,实现了通信网络高效的链路调度与资源分配。

参考文献:

- [1] 高克俭. 高速铁路 TD-LTE 网络规划的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
GAO K J. Research on TD-LTE network planning of high speed railway[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [2] RISPOLI F, FILIP A, CASTORINA M, et al. Recent progress in application of GNSS and advanced communications for railway signaling[C]//2013 23rd International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA). IEEE, 2013.
- [3] ZHOU D, SHI T Y, LYU X, et al. A research on banded topology control of wireless sensor networks along high-speed railways[C]//2015 34th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2015.
- [4] 施政. 异构网络中无线资源管理技术的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.
SHI Z. Research on wireless resource management technology in heterogeneous network[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013.
- [5] 张兵. 软件定义物联网架构下异构网络融合方法研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019.
ZHANG B. Research on heterogeneous network convergence method based on software defined Internet of things[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2019.
- [6] 翟立君, 汪春霆. 天地一体化网络和空中接口技术研究[J]. 无线电通信技术, 2015, 41(3): 1-5.
ZHAI L J, WANG C T. Research on space and terrestrial integrated network and air interface[J]. Radio Communications Technology, 2015, 41(3): 1-5.
- [7] ERTEKIN E, CHRISTOU C A. Internet protocol header compression, robust header compression, and their applicability in the global information grid[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(11): 106-116.
- [8] PULLIAM J, ZAMBRE Y, KARMARKAR A, et al. TSAT network architecture[C]//2008 IEEE Military Communications Conference (MILCOM). IEEE, 2008.
- [9] VANELLI-CORALLI A, CORAZZA G E, LUGLIO M, et al. The ISICOM architecture[C]//2009 International Workshop on Satellite and Space Communications. IEEE, 2009.
- [10] BHASIN K B, PUTT C, HAYDEN J, et al. Architecting the communication and navigation networks for NASA's space exploration systems[C]//IEEE International Conference on System of Systems Engineering. IEEE, 2007.
- [11] 汪宇. 空间信息网络资源管理架构及方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
WANG Y. Research on architecture and method of spatial information network resource management[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [12] 3GPP, Technical Specification Group Radio Access Network. Study on scenarios and requirements for next generation access technologies: TR 38.913[S]. 2018.
- [13] 汪春霆, 李宁, 翟立君, 等. 卫星通信与地面 5G 的融合初探(一)[J]. 卫星与网络, 2018(9): 14-21.
WANG C T, LI N, ZHAI L J, et al. Discussion on the integration of satellite communication and ground 5G(1)[J]. Satellite & Network, 2018(9): 14-21.
- [14] 裴郁杉, 张忠皓, 王婷婷. 空天地一体化通信网络发展愿景与挑战[J]. 邮电设计技术, 2020(4): 15-20.
PEI Y S, ZHANG Z H, WANG T T, et al. Vision and challenge of air space integrated communication network[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2020(4): 15-20.
- [15] MOSAHEBFARD M, VARDAKAS J, RAMANTAS K, et al. SDN/NFV-based network resource management for converged optical-wireless network architectures[C]//2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). IEEE, 2019.
- [16] GUDIPATI A, PERRY D, LI L E, et al. SoftRAN: software defined radio access network[C]//2nd ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking-HotSDN'13. ACM, 2013.
- [17] 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.
- [18] SHI Y P, CAO Y R, LIU J J, et al. A cross-domain SDN architecture for multi-layered space-terrestrial integrated networks[J]. IEEE Network, 2019, 33(1): 29-35.
- [19] CHIEN W C, LAI C F, HOSSAIN M S, et al. Heterogeneous space and terrestrial integrated networks for IoT: architecture and challenges[J]. IEEE Network, 2019, 33(1): 15-21.
- [20] SHARMA P K, SINGH S, JEONG Y S, et al. DistBlockNet: a distributed blockchains-based secure SDN architecture for IoT networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(9): 78-85.
- [21] SUN J, LIU F, AHMED M, et al. A unified framework for software defined sensing, transmission and computing[J]. IEEE Access, 2019, 7: 48923-48934.
- [22] 蒋志勇, 左自辉, 殷亚勋, 等. 铁路下一代移动通信系统业务需求分析[J]. 铁道通信信号, 2013, 49(z1): 1-4.
JIANG Z Y, ZUO Z H, YIN Y X, et al. Service requirement analysis of railway next generation mobile communication system[J]. Railway Signalling & Communication, 2013, 49(z1): 1-4.
- [23] IANO Y, ABEL D, MORETTI A, et al. What will 5G be? trends for nanotechnology, video systems, networks management, radio frequency, spectrum management, and regulation in Brazil[C]//Brazilian Technology Symposium. 2015.
- [24] 龚向阳, 王文东. 一种面向多样化网络业务融合的 SDN 网络架构[J]. 中兴通讯技术, 2013, 19(5): 16-21.
GONG X Y, WANG W D. SDN infrastructure for converging of diverse network services[J]. ZTE Technology Journal, 2013, 19(5): 16-21.
- [25] 李明江. SNMP 简单网络管理协议[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.

- LI M J. SNMP simple network management protocol[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [26] 梁亮, 芮兰兰. 通用网络管理机制中接口协议技术的应用分析[J]. 电信工程技术与标准化, 2009, 22(12): 37-40.
- LIANG L, RUI L L. Analysis of interface technologies in generic network management mechanism application[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2009, 22(12): 37-40.
- [27] 张建敏, 谢伟良, 杨峰义, 等. 移动边缘计算技术及其本地分流方案[J]. 电信科学, 2016, 32(7): 132-139.
- ZHANG J M, XIE W L, YANG F Y, et al. Mobile edge computing and application in traffic offloading[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(7): 132-139.
- [28] 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(2): 35-40.
- ZHANG H, HUANG X Y, MENG X J, et al. Research on SDN/NFV based integrated network architecture[J]. Journal of Military Communications Technology, 2017(2): 35-40.
- [29] XU H, CHANG Y Y, SUN T X, et al. Modeling and analysis of up-link-downlink relationship in heterogeneous cellular network[C]// 2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC). IEEE, 2015.
- [30] HU Y R, LI V O K. Satellite-based Internet: a tutorial[J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(3): 154-162.
- [31] 方小川. 面向5G移动通信的天线技术研究及设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- FANG X C. Research and design of antenna technology for 5G mobile communication[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [32] 史飞. 异构无线网络中低时延切换的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- SHI F. Research on low delay handoff in heterogeneous wireless networks[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [33] 王达. Wi-Fi是个啥[J]. 计算机与网络, 2015, 41(22): 38-39.
- WANG D. What is Wi-Fi[J]. Computer & Network, 2015, 41(22): 38-39.
- [34] 赵泽宇. GSM-R与LTE-R网络对比[J]. 铁道通信信号, 2018, 54(8): 84-87.
- ZHAO Z Y. Comparison between GSM-R and LTE-R networks[J]. Railway Communication Signal Specialty, 2018, 54(8): 84-87.
- [35] 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.
- [36] ZHU J, ZOU Y L, WANG G P, et al. On secrecy performance of antenna-selection-aided MIMO systems against eavesdropping[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(1): 214-225.
- [37] HE D J, CHEN C, CHAN S, et al. Secure and efficient handover authentication based on bilinear pairing functions[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(1): 48-53.
- [38] XIANG Q, WANG X T, ZHANG J J, et al. Unicorn: unified resource orchestration for multi-domain, GEO-distributed data analytics[J]. Future Generation Computer Systems, 2019.

- [39] 李林哲, 周佩雷, 程鹏, 等. 边缘计算的架构、挑战与应用[J]. 大数据, 2019, 5(2): 3-16.
- LI L Z, ZHOU P L, CHENG P, et al. Architecture, challenges and applications of edge computing[J]. Big Data Research, 2019, 5(2): 3-16.

[作者简介]



滕颖蕾(1983-),女,山东烟台人,博士,北京邮电大学教授,主要研究方向为超密集网络、边缘计算及人工智能、大规模MIMO、区块链、空天地融合网络等。



李鑫(1997-),女,安徽安庆人,北京邮电大学硕士生,主要研究方向为空天地融合网络、软件定义网络等。



王剑(1978-),男,山西隰县人,北京交通大学教授、电子信息工程学院副院长,主要研究方向为列车运行控制、卫星导航、智能交通等。



蔡伯根(1966-),男,江苏如皋人,博士,北京交通大学教授,主要研究方向为卫星定位导航理论及应用、列车运行控制、智能交通系统、多源信息融合、工业控制系统网络安全等。



宋梅(1960-),女,天津人,博士,北京邮电大学教授,主要研究方向为异构和认知网络中的资源分配、移动管理以及未来通信领域的其他技术。