



综述

智慧城轨交通通信技术的分析与展望

赵军辉^{1,2}, 张丹阳¹, 贺林¹

(1. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044;

2. 华东交通大学信息工程学院, 江西 南昌 310033)

摘要: 为解决由城轨环境特殊性导致的通信可靠性、时延性能降低以及运营效率瓶颈等问题, 首先从整体运营控制的角度分析了城轨通信需求。结合新型智能运行控制技术及 T2T (train to train, 列车到列车) 通信、5G、人工智能、移动边缘计算等新兴信息技术对城轨通信关键技术进行梳理、总结与展望; 然后提出了一种新型城轨通信网络架构, 最后探讨了智慧城轨通信技术的研究方向与面临的挑战, 为智慧城市的发展提供研究基础。

关键词: 城市轨道交通; 列控系统; 车-车通信; 移动边缘计算; 人工智能

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021029

Analysis and prospect of communication technology in smart urban rail

ZHAO Junhui^{1,2}, ZHANG Danyang¹, HE Lin¹

1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2. School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 310033, China

Abstract: The particularity of the urban rail transit environment leads to the problems such as reducing communication reliability, delay performance and operating efficiency bottlenecks. Therefore, the demand for urban rail communication was analyzed from the perspective of overall operational efficiency. New intelligent communication control technologies such as T2T (train to train) communication, 5G, artificial intelligence, and mobile edge computing were combined to summarize and prospect the key technologies of urban rail communication. Then, a new type of urban rail communication network architecture was proposed. Finally, the research direction and challenges of smart urban rail communication technology were discussed, which also provided a research foundation for the development of smart cities.

Key words: urban rail transit, train control system, train to train communication, mobile edge computing, artificial intelligence

收稿日期: 2020-12-14; 修回日期: 2021-01-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U2001213, No.61661021, No.61971191); 北京市自然科学基金资助项目 (No.L182018, No.L201011); 国家重点研发计划项目 (No.2020YFB1807204); 中国科学院上海微系统与信息技术研究所开放课题项目 (No.20190910); 江西省自然科学基金重点项目 (No.20202ACBL202006)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.U2001213, No.61661021, No.61971191), The Beijing Natural Science Foundation (No.L182018, No.L201011), The National Key Research and Development Project (No.2020YFB1807204), The Open Project of Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology (No.20190910), The Key Project of Natural Science Foundation of Jiangxi Province (No. 20202ACBL202006)



1 引言

我国城市轨道交通（简称城轨）交通建设正逐渐步入信息化、智能化时代，开始向高效、安全、可靠的智慧型城轨迈进。随着移动边缘计算（mobile edge computing, MEC）、物联网、人工智能、5G 等新兴技术的发展，城轨交通系统将与新兴技术逐渐融合，采用更智能化的通信技术，不断提升城轨交通智能化水平。

城轨交通是我国关键基础设施与产业的核心。根据中国城市轨道交通协会发布的最新统计数据，截至 2020 年 12 月 31 日，中国（不包括港澳台）已有 45 个城市开通轨道交通，运营里程达 7 978.19 km，其中地铁总里程达 6 302.79 km，占比 79.00%。2011—2020 年，城市轨道交通新增营业里程达 7 655.92 km，根据新增在建线路，预计到 2021 年年底，我国城市轨道交通累计营业里程将达到 8 728 km。近年来，北京、上海两市城轨交通年客运总量均已接近 40 亿人次，占公共交通出行总量的 50% 以上。从城市建设规划的角度来看，未来人们选择城轨交通出行方式的占比将大幅度提高，城轨交通将长期保持高速发展，同时，城轨场景通信需求随之大幅增长。

中国城市轨道交通协会发布的《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》是“智慧城轨”的指导性文件。该文件指出“智慧城轨”是城市轨道交通领域为响应“交通强国”战略，与智慧城市对接的一个具有深远研究意义的课题。本文响应“智慧城轨”发展纲要，对城轨交通系统中的通信技术进行分析、阐述与总结，考虑从传统的轨道交通通信技术向具备智能化的新型智能通信技术过渡问题，同时进行横向对比，分析目前已有的观点、解决方案，指出最新的研究方向与面临的挑战，以期从通信层面对“智慧城轨”开展研究。

2 智慧城轨通信发展需求

城轨交通安全、高效地运营离不开列车运行

控制系统（简称列控系统），伴随智慧城市发展，城市逐渐开始沿着智能化、集群化的方向发展，市民的出行需求逐年提升。列车智能控制、海量数据监控以及人工智能等技术的发展都促使城轨系统内部的通信需求激增。

2.1 列车运行控制系统驱动下的通信需求

从轨道电路到无线通信，从单向通信到双向实时通信，列控系统的发展历经了质的跨越。基于通信的列控（communication-based train control, CBTC）系统采用与轨旁设备进行无线通信的方式解决了列车到地面（train to ground, T2G）的实时双向通信问题。早期的 CBTC 系统采用无线局域网（wireless local area network, WLAN）技术，能够承载较大容量的传输信息、更为可靠的传输状态和控制命令信息，在一定程度上增加列车运行的可靠性，降低运行中存在的安全风险。然而，采用 WLAN 的 CBTC 系统存在功能子系统及相关设备繁多、各个子系统间耦合程度较高、数据传输稳定性差以及易受干扰等问题，限制了整体系统的灵活性^[1-2]。

为了更好地解决上述问题，地铁长期演进（long term evolution for metro, LTE-M）技术被提出，LTE-M 技术是目前应用于城轨交通通信系统的先进技术，但该通信技术不能应对较为复杂的紧急情况，并且无法提供如自动驾驶和铁路物联网（railway internet of thing, RIoT）的大规模连接等某些潜在的铁路服务^[3]。此外，由于车地间无线资源短缺，资源利用效率较低，LTE-M 技术仍然存在传输时延高、稳定性差等缺点，长期来看也无法满足日益增长的城轨交通的数据传输要求。

现如今，新一代的全自动运行（fully automatic operation, FAO）系统已经进入了实践和完善的快速发展阶段。目前国内已有北京、上海、广州、武汉、香港 5 座城市开通 7 条全自动运行线路（GoA3 级~GoA4 级）^[4]。新一代 FAO 系统是基于现代高性能计算机、高速通信、可靠控制和系

统集成等技术实现的,以行车指挥为核心,融合集成了信号系统、行车综合自动化系统、车辆系统、通信系统、监控系统等,整体自动化水平有了很大提升^[5]。FAO系统目前采用LTE-M技术对一些实时性和关键性的数据进行传输,同时利用无线局域网技术发送和接收非实时性数据及记录文件。

不论是基于WLAN还是基于LTE-M的列控系统,均以T2G通信架构为主,传输时延高,抗灾与防突发事件性能较差。近年来,更多的研究开始转向一种新型的基于列车到列车(train to train, T2T)通信的运行控制系统。该技术考虑列车间的通信需求,使得列车无须经过地面中转即可进行列车到列车间的直接通信,在降低时延的同时能够进一步保障列车安全运行^[6]。

2.2 万物互联与海量数据监控驱动下的通信需求

万物互联的时代,终端节点数目和数据通信量表现出爆发式增长的态势,传统的云计算模式虽然有较强的计算和存储能力,但是,随着市民出行需求的增加,大量电子终端、传感器数量增加以及海量数据的涌现,异构数据融合与优化等问题变得尤为突出^[7]。传统云计算将带来较高的传输时延,消耗更多的带宽资源。为了满足万物互联应用的发展需求,需要一种高效的数据传输处理技术。与此同时,为了保障城轨列车安全可靠运行,还需要对大量基础设施设备进行数据采集与监控,保障关键运营信息低时延传输。

城轨综合监控系统包含闭路视频监控系统、乘客信息系统、无线列调、广播系统、火灾自动警报系统、自动售检票系统、互联门禁系统、车辆运维和紧急呼叫等系统。上述系统均需与外界进行联动,紧密依赖于城轨通信系统。特别是乘客信息系统,每辆列车最低需要支持2路8 Mbit/s的下行带宽,而闭路视频监控系统则需要高达30 Mbit/s的传输带宽的支持^[8]。目前我国各地的城

轨通信制式不一,新老线路的数据互通、跨线运营以及不同制式之间的互联互通等问题就会出现;在一定时期内,需要宽窄带通信进行融合,并在业务上混合编组、统一编号、统一调度,甚至在关键业务传输上可以以冗余链路的形式出现^[9]。

随着列车智能运维技术的发展,更多的车载监控应用需要进行无线数据传输。例如,智能列车诊断、智能运程下载、自动弓网关系监视等,这些新型智能化应用对传输带宽的需求越来越高。综合监控系统作为承载列车运营安全的关键系统之一,承载了除列控系统以外的绝大多数数据传输任务,作为城轨系统的核心之一,其将与新型通信技术结合应用。5G的商用也为城轨系统迅猛增长的数据提供了新的研究思路和设计方向。城轨交通的快发展、高需求也将为通信技术带来新的驱动力。

2.3 人工智能驱动下的通信需求

计算机计算能力的不断提升以及人工智能领域算法的不断完善使机器学习在计算机视觉、自然语言处理、语音识别、机器人和智能交通等领域中取得了较大的成功^[10]。特别是深度强化学习(deep reinforcement learning, DRL)算法的提出,其将强化学习(reinforcement learning, RL)和深度学习(deep learning, DL)结合,利用RL的决策控制能力定义目标问题,对复杂问题进行决策与判断,利用DL的深层感知能力进行复杂参数的特征提取,解决策略与决值函数之间的建模问题,目前在通信与控制领域已经出现了相关的研究^[11-14]。

由于轨道交通的特殊性,如列车运行线路固定,车站位置固定,轨道列车在无人驾驶领域能够发挥其巨大的优势。随着城市内出行需求的急速增加,城轨交通列车必须提升其运输效率,需要进一步缩短列车追踪间隔。传统T2G架构下的列控系统由于时延、可靠性等参数无法满足进一



步缩短行车间隔的需求,一种基于 T2T 通信的新型列车编队控制思想逐渐出现在相关研究领域,并引起了相关研究人员的注意。列车编队旨在从系统层级的角度全方位感知线路中每辆列车的作用及位置,通过全局视野,能够在保证列车运行安全的基础上,将追踪间隔缩短。列车编队建立在 T2T 通信的基础上,是实现无人自动驾驶与控制的基础技术之一。而无人驾驶列车的核心又包含智能通信、智能控制等与人工智能结合的相关技术,因此以人工智能技术为基础的智能化解方案将不断刺激城轨系统的发展与完善。

城轨列车在行驶中由于高速移动状态所导致的信道时变特性会使得通信传输性能剧烈下降,因此可以通过无线通信网络管理,在动态变化的无线环境中对网络的各个参数进行优化。这类动态环境中的最优决策问题,与 DRL 的设计目标相契合^[15]。DRL 也是智能无线通信的重要赋能者之一。DRL 强大的学习和决策能力可以对城轨通信网络进行智能管理,使其在复杂的通信场景下可以对不同应用的服务需求进行精准匹配,最终提高网络的实际传输承载能力。通过引入 DRL 算法,可以对城轨无线通信网络参数以及列车控制参数进行优化决策,可以提升整体系统的鲁棒性与服务质量^[16-17]。基于 DRL 的智能化列车控制以及通信资源管理等技术是目前突破城轨列车运营效率瓶颈的重要途径之一。凭借人工智能技术强大的特征提取、优化等算法,能够极大地促进通信资源充分利用以及控制策略性能提升,保障高效、低能耗的城轨运营形态。因此,人工智能技术将助力“智慧城轨”的发展。

3 智慧城轨通信关键技术

“智慧城轨”通信技术为各个子系统提供保障和技术支持,分别从承载列控的通信关键技术、移动边缘计算技术、人工智能与列车编队技术这 3 个角度对城轨智慧通信关键技术进行阐述,同时

结合最新的研究进展,指出未来“智慧城轨”智能通信技术的发展方向。

3.1 承载列控的通信关键技术

3.1.1 车-地无线通信关键技术

目前正在使用的 CBTC 系统主要基于 WLAN 技术,该技术采用 IEEE 802.11 标准,通过竞争接入的方式使用 2.4 GHz 非授权频段传输列车运行状态以及控制命令,具有开放、进步、融合的技术发展路径。WLAN 技术共用开放频谱资源、方便认证接入、支持移动及宽带接入等性能。其新标准融合了很多前沿技术,支持不断提升的网络带宽。

作为一种依靠车地间通信的列控系统,CBTC 不依赖于轨道电路,能够实现高精度的列车定位和双向连续、高数据容量的车地通信。该系统中车载、地面的安全功能处理器实现的是一种连续自动列车控制系统^[18]。基于 WLAN 的 CBTC 系统能够同时承载列车运行监控、乘客信息、闭路视频监控等业务。然而,采用 WLAN 技术的车地无线通信系统并不能满足未来城轨发展的高行驶速度、广覆盖、资源优先分配以及较强的抗干扰能力等需求。

基于通信的列控技术会随着通信系统的发展进行演变和更替。新兴通信技术和列控技术的融合可以满足城市轨道交通目前以及未来的发展需求,不断推动其向智能化、信息化发展。目前已经投入运营的基于 WLAN 的列控系统,其性能受非授权频段干扰,列车紧急制动事件时有发生。为了解决这一问题并提升 CBTC 系统性能,城市轨道交通协会提出了一种利用专用授权频段部署基于 LTE-M 的解决方案。LTE 是基于正交频分复用(orthogonal frequency division multiple, OFDM)的第四代移动通信技术,该技术采用扁平化的网络架构,依靠 20 MHz 的无线带宽,支持下行 100 Mbit/s 以及上行 50 Mbit/s 的传输速率,在全球得到了广泛应用。此外 LTE-M 系统有严格的服

务质量 (quality of service, QoS) 保障机制, 针对系统不同业务选择具有不同 QoS 性能保障的数据链路并分别进行任务承载, 一定程度上能够为乘客提供安全可靠的服务, 提高铁路网络基础设施的利用率^[19]。基于 LTE-M 的 CBTC 系统结构如图 1 所示, 其在接入架构以及地面设备方面有所简化, 网络结构与 WLAN 系统相比更加扁平化。

然而, 由于授权频段资源稀缺, 现有城轨交通通信网络的可用授权频段紧张, 因此授权频段将无法综合承载 LTE-M 系统业务的要求。与现有传统的城轨通信系统相比, LTE-M 采用频段为 1 785~1 805 MHz 的授权频段, 基本能够提供较为全面的铁路信息服务。考虑到 LTE-M 频谱资源仍存在一部分交叉不可用带宽以及城轨交通业务对于可靠性和实时性的需求, 目前已经商用的 5G 系统成为解决城轨交通系统数据承载的重点研究对象。参考文献[20]提出了一种基于毫米波的列控系统, 仿真结果表明该系统可以有效解决列车传输频谱资源短缺的问题, 提升频谱效率。5G 系统的目标是实现无缝、可靠的全球互联互通,

解决网络发展困境, 满足未来社会的大数据需求^[21]。城轨交通列车乘客流量大、换乘频率高、运行速度快等特点对承载数据的传输系统提出了极为严格的要求, 这也符合 5G 提出的三大典型应用场景: 增强移动宽带 (enhanced mobile broadband, eMBB)、超高可靠低时延通信 (ultra-reliable low-latency communications, uRLLC) 以及海量机器型通信 (massive machine type communications, mMTC)。作为异构集成网络, 5G 将向后兼容现有的无线通信技术。这意味着在 5G-M 能够支持现有的铁路服务的情形下, 还能提供各种新兴的铁路服务, 例如轨道沿线的实时视频监控、多媒体调度以及大规模连接的 RIoT 业务, 这将为“智慧城轨”发展奠定基础。

3.1.2 车-车无线通信关键技术

该系统参考设备到设备 (device to device, D2D) 通信的思想, 实现列车之间的信息交互。在早期, T2T 通信被当作避撞的冗余手段, 例如 2007 年德国宇航研究中心 (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) Andreas 等^[22]提出了铁

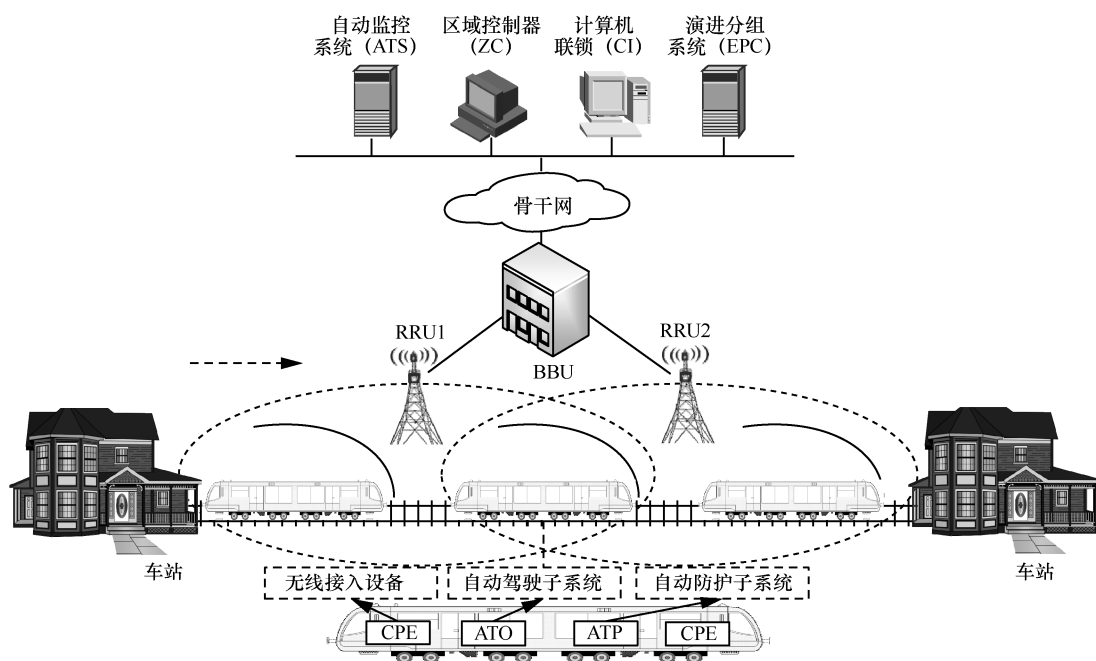


图1 基于LTE-M的CBTC系统结构



路防撞系统 (railway collision avoidance system, RCAS), 该系统获取的速度、位置等信息能够以列车间广播的形式发送给邻近区域内的其他列车。采用 T2T 通信的列控系统, 无须再进行集中式的地面控制, 因而可以降低车地间的信息交互频次, 减小传输系统载荷, 从而提高整个系统的性能。基于 T2T 通信的列控系统以列车为核心, 通过列车间的交互、轨旁资源的控制等方法实现列车的自主安全运行控制^[23]。

基于 T2T 通信的 CBTC 系统是更高层级的信号控制系统, 它使得城轨交通网络中“左右、前后”多个列车之间互联互通、协调运行, 是新一代具有更高可靠性、更高运行效率、更节省时间、更低成本的列控系统。基于 T2T 通信的新型列控系统目前已经引起了较为广泛的关注。参考文献[24]提出了一种基于 T2T 通信的 CBTC 系统, 并且对该系统的核心功能进行了介绍与分析。参考文献[25]提出了一种基于 T2T 通信的列车防撞系统, 该系统将传统的地面部分功能移植到车载设备上, 以此降低地面设备的复杂度, 增强系统的灵活性、稳定性。由此看来, 城轨列车之间直接通信能够保障列车更加可靠稳定运行, 提升运营效率, 是未来发展和研究的趋势。

T2T 系统总体框架结构如图 2 所示, 通过 T2T 通信, 每辆列车都可以获取其相邻列车的状态信息, 自主计算并生成移动权限 (movement authority, MA), 不再需要地面设备的相关控制权限。在此系统下, 地面设备得到了简化, 其仅包含自动测试系统 (automatic test supervision, ATS)、列车管理中心 (train manage center, MC)、对象控制器 (object controller, OC) 以及轨旁信号基础设施 (道岔)。TMC 具有传统区域控制器 (zone controller, ZC) 的安全功能, 例如列车的注册与取消、列车信息存储和转发等。OC 作为简单的对象状态采集和控制单元, 本身不具有复杂的逻辑处理功能, 它负责获取信号灯和开关等基础信号设备的状态, 并传达相关控制指令。作为一种新型列控系统, 当车地间通信与车车间通信并存时, 通信资源 (如信道资源) 会出现抢占问题, 同时也会出现资源分配冲突问题, 从而导致编队列车控制问题的出现。

3.2 移动边缘计算技术

现有网络场景下, 无线传输空口资源有限, 系统带宽以及时延等指标依然无法满足当前城轨交通运营的业务场景需求, 存在链路资源短缺、吞吐量低、传输时延高等问题。为了进一步对城

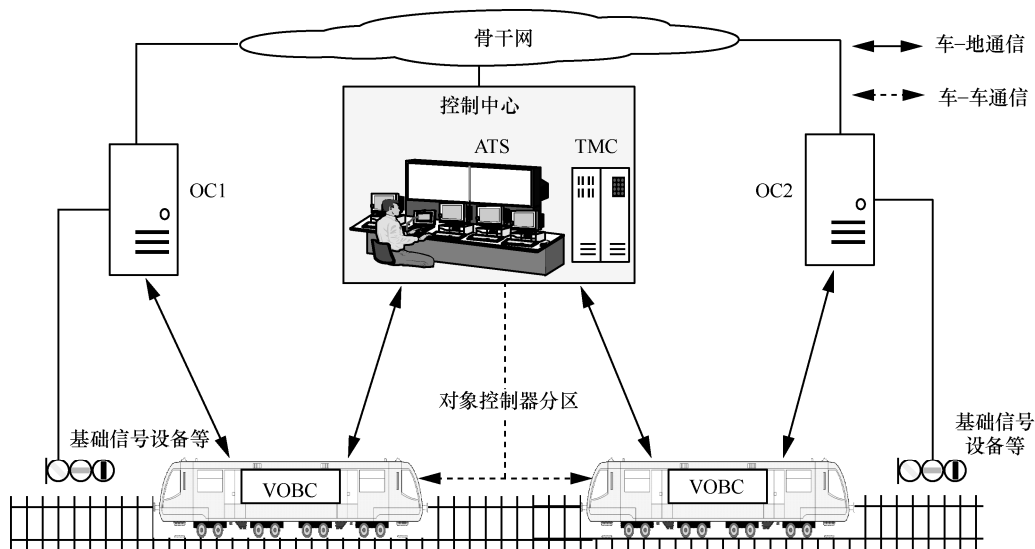


图 2 T2T 系统总体框架结构

轨无线通信系统进行优化,满足超大带宽、海量链接、超低时延、高可靠、高能效的城轨通信需求,相关研究人员将目光转向 MEC 技术。在现有通信系统的基础上结合 MEC 技术,在列车、基站、车站等地分别部署 MEC 服务器^[26],利用 MEC 服务器自身具备的计算、存储等能力提供智能服务,使得原本需要在城轨专网或者外部云平台处理的业务下沉至列车或车站等边缘侧,从而降低了网络服务响应时延,提高了通信资源使用效率,优化现有通信系统,实现通信、计算与存储资源的高效融合以及弹性分配。参考文献[27]提出在高铁通信网络中部署 MEC 服务器,并通过实际网络试验结果显示该部署方案能够有效提升传输速率、减小传输时延。尽管该文献是从高速铁路的角度进行分析的,但提出的架构和相关策略只要进行适当调整也可为其他场景(例如城市轨道交通场景)提供支持。

未来轨道移动通信网络架构如图 3 所示,采用 MEC 技术优化城轨交通通信系统,其主要思想是在铁路沿线部署 MEC 服务器,使列车通信数据在源头附近就能得到及时有效的处理,达到提升无线传输稳定性和降低时延的目的,并最终提升用户体验。另外,基于 MEC 技术的城市轨道交通系统中,列车实时感知的道路状况、障碍物和周围环境等

信息可通过 MEC 技术实现快速计算和传输,从而预测下一步该如何行驶,进而提升列车全自动驾驶的可靠性。采用 MEC 辅助的城轨通信网络架构可以在通信、娱乐、视频监控、系统维护和 RIoT 等多个方面给予支持,为相关业务提供低时延、高带宽的运营环境。

3.3 人工智能与列车编队技术

与人工智能技术结合的智慧城轨交通系统可以简化列车与地面之间复杂的通信系统结构,从而得到运营效率高、资源利用率高的优化方案。采用 T2T 通信的列控系统,增加了列车与列车之间的直接通信技术,系统内部的 T2G 链路和 T2T 链路之间可能会出现资源复用的问题,使得频谱资源更加紧缺,给城轨通信系统带来了更大的压力。

为了解决 T2G 与 T2T 之间同频干扰问题,针对 T2T 通信资源分配问题,提出了一种基于多智能体深度强化学习(multi-agent deep reinforcement learning, MADRL)算法,该算法将每辆行驶中的列车看作一个智能体,智能体与环境进行交互后独立地选择下一步的动作,实现信道资源的有效分配。与参考文献[14]模型类似,假设如图 2 所示的 T2T 通信场景,仿真所需的详细参数见表 1。

T2T 架构系统中的列车数量与系统的总吞吐量之间的关系如图 4 所示,与随机方案相比,所提方案可以有效地提高系统的总吞吐量,并且随着列车数量的增加,所提方案的优势更加明显。随着列车数量的不断增加,系统的总吞吐量也随之增加。然而,随之增加的 T2T 链路和 T2W 链路数量会带来更多的同频干扰,从而导致系统吞吐量的增加速率变慢。仿真结果验证了 MADRL 算法在通信资源分配场景的优越性,该方案可以有效解决频率资源紧张、同频干扰等问题。

在类似于 T2T 通信架构的系统中,编队控制

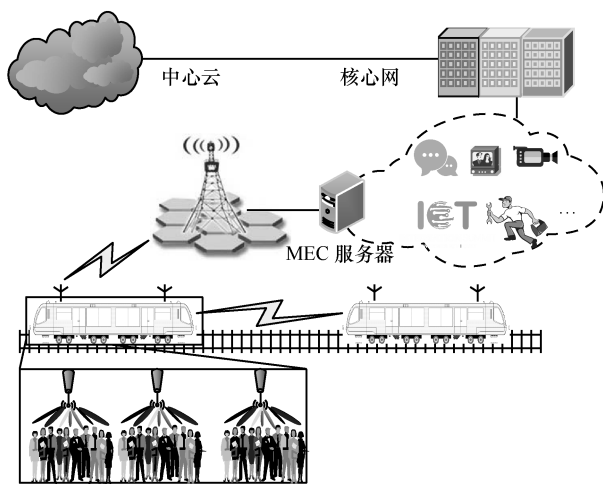


图3 未来轨道移动通信网络架构



表 1 仿真所需的详细参数

参数	取值
带宽 B	10 MHz
BS 覆盖半径	3 km
天线增益	7 dBi
BS 接收机噪声系数	5 dB
列车的天线增益	4 dBi
列车接收机噪声系数	8 dB
列车速度	65~90 km/h
相邻列车间的距离	600~900 m
T2W 发射功率	43 dBm
T2T 发射功率等级	{10,23,33} dBm
T2W 链路路损模型	$37.6 \lg d + 128.1 \text{ dB}$
T2T 链路路损模型	$40 \lg d + 148 \text{ dB}$
学习率 α	0.001
折扣率 γ	0.4
权重因子 λ	{0.1,0.15,0.18,0.2,0.205,0.25}

是一种能够提升系统效率的有效控制手段,在相关领域已经有了非常多的应用实例,例如舰艇编队、战机编队等。通过编队技术可以发挥系统内各组成部分的最大优势,提升系统整体性能。早在 2014 年“Shift2Rail”项目问世以来,欧洲便将研究方向聚焦于虚拟耦合列车^[28]。虚拟耦合列车编组技术可以实现更加灵活的列车编组控制。列车协同编队以 T2T 通信为技术基础,以自动控制和驾驶为操作手段。T2T 通信架构下的列车协同

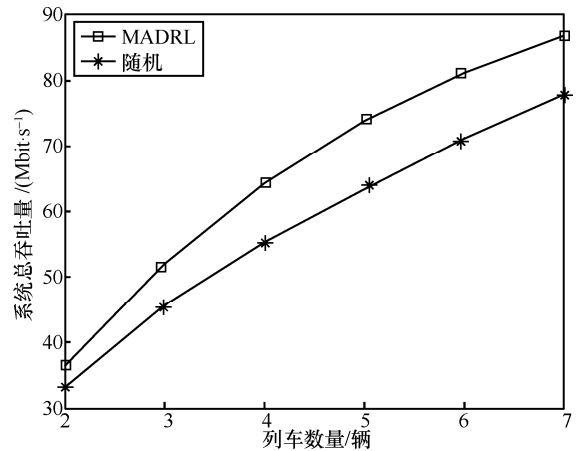


图 4 系统总吞吐量与列车数量之间的关系

编队系统结构如图 5 所示,在列车协同编队系统中,每辆列车在高精度定位技术下,可以知道自己所运行的准确位置。通过 T2T 通信,相邻列车周期性地获取彼此的位置和速度,基于这些信息进行列车追踪,可以进一步缩短列车行车间隔,提升城轨运营效率。

随着我国城轨交通的快速发展,行业信息化建设也已进入快速发展阶段,高速、稳定的通信业务需求不断产生和扩展,自动驾驶、RIoT、高清视频监控、列车信息实时远程监测、智能列车、智能化旅客服务等多种新型智能化业务需求不断地涌现。然而,全国城轨交通发展条件、起步时间、基础建设水平和目前所处的阶段均存在差异。

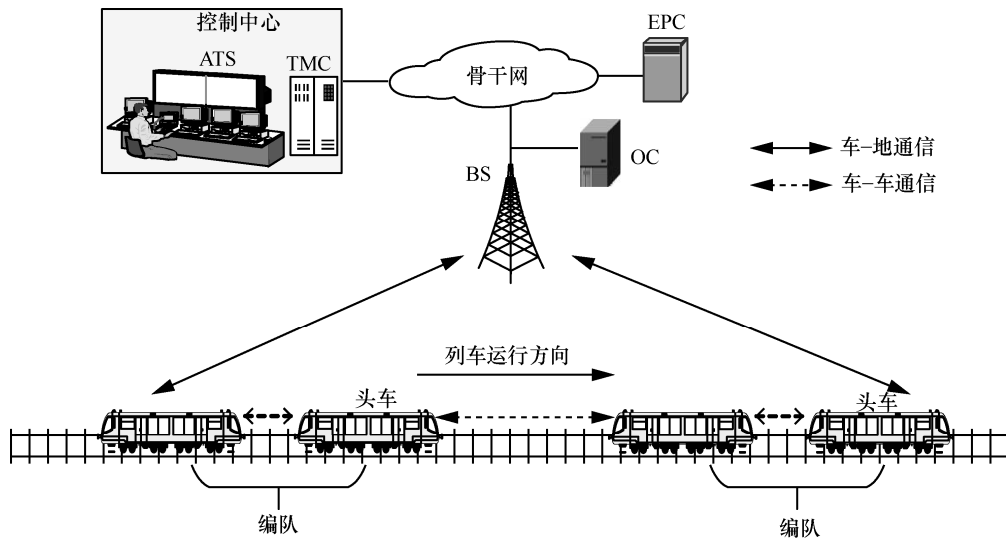


图 5 T2T 通信架构下的列车协同编队系统结构

伴随一系列先进新兴信息技术的高速发展,城轨交通智能化水平将在现有发展的基础上大大提升。以机器学习为代表的与人工智能技术相结合的新型通信、控制解决方案将为城轨交通系统的发展注入新鲜血液,推动“智慧城轨”的发展与完善。

4 技术与挑战

本节首先对采用不同技术架构下的通信系统进行横向对比,见表2。接着分析、讨论并提出了一种未来城轨通信网络架构以及可能面临的挑战,为后续“智慧城轨”交通的发展奠定了研究基础。

4.1 无线通信覆盖

毫米波频段和5G-M系统的提出,在给城市轨道交通系统提供大带宽和高数据速率传输能力的同时,也带来了无线覆盖的问题。得益于大规模天线阵列的使用,集中式的大规模多输入多输出与波束成形技术相结合,能够形成方向性佳、增益大的窄波束,从而追踪移动中的列车,同时大幅提升系统容量^[29]。虽然联合波束成形可以将辐射的能量集中在预期的方向上,以最大限度地减少干扰并大大提高用户的数据传输速率。但列

车较高的移动速度给波束搜索带来一定的阻碍,波束可能无法实时进行调整、对齐^[30],这极大地影响了通信传输的质量,需要对波束、列车移动性进行联合管理。其次,5G的高频带传输和较低的覆盖能力,意味着5G高频基站的部署将更加密集,由此引发的频繁切换问题也将更加严峻^[31]。由于城轨场景较高的复杂性,毫米波频段带来丰富带宽资源的同时,可能会因为某些遮挡地形环境带来短时的链路中断,从而造成巨大的安全隐患以及经济影响^[32]。

5G-M高低频组网架构如图6所示,5G-M系统以低频段基站部署宏小区覆盖,保障高速移动条件下的关键安全数据可靠传输,提供高鲁棒性广覆盖;以高频段基站进行微小区部署,提高非安全类数据的传输速率。另外,在新的移动通信网络架构中,T2T通信以及边缘计算设备可以保证一些时延敏感型业务的需求,提升无线传输的稳定性,但势必也会引入边缘设备的覆盖和切换问题。在5G通信系统架构下,可以考虑基于毫米波的T2T传输方案。尽管T2T通信用于城轨列车盲点警告和碰撞预警时可能不需要很高的带宽,但预计未来其他应用可能需要系统具备较高的传输速率,如列车自动驾驶所需的自动巡航控制。

表2 城轨交通通信技术对比

通信解决方案	系统架构	通信模式	信号系统数据吞吐	理论最高支持列车运行速度	优势与限制
TBTC	轨道电路	单向传输车到地信息	/	80 km/h	无须无线传输,但基于电气化轨道电路的安全隐患高
WLAN	轨旁AP+无线传输媒介	车地间双向实时传输	3 Mbit/s	140 km/h	支持无线传输,但数据速率低,车地传输设备复杂,极易受到干扰
LTE-M	轨旁BBU+RRU+无线传输媒介	车地间双向实时传输	10 Mbit/s	200 km/h	提供更高的数据传输速率,但频谱资源稀缺,频谱利用率较低
LTE-M+MEC	同上并增加MEC服务器	车地间双向实时传输	≥10 Mbit/s	200 km/h	满足较高数据传输速率并优化传输时延,但成本较高
T2T	在CBTC系统基础上增加车-车通信设备,简化车地通信	车地间双向实时传输,并增加冗余车到车通信	WLAN: ≥3 Mbit/s LTE-M: ≥10 Mbit/s	WLAN: 140 km/h LTE-M: 200 km/h	提升列车安全性能以及运行效率,但频谱资源限制导致新的资源分配问题
5G-M	基于5G通信系统	车地间双向实时传输	≥500 Mbit/s	250 km/h	数据传输速率极高,但覆盖范围小,存在频繁切换以及高昂的建设成本问题

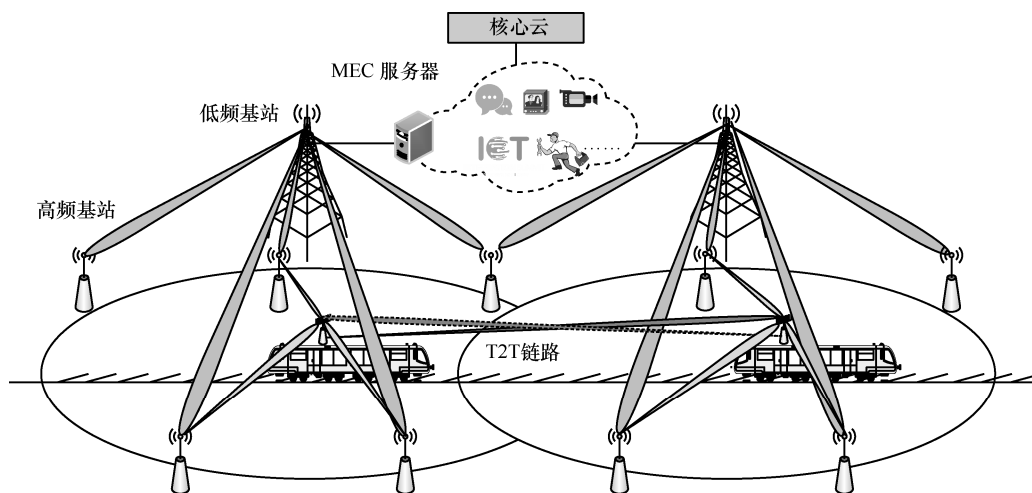


图6 5G-M 高低频组网架构

此外,列车毫米波通信系统在图像和高速数字通信等大容量传送信息方面也能发挥作用。由毫米波多天线技术所带来的接收信号信噪比的大幅度提升,可以保障 T2T 通信的可靠性,这进一步促进了城市轨道交通系统中毫米波 T2T 通信的应用。相关的系统设计和传播测量在参考文献[33]中也得到了验证。

近期较多的研究将目光转向了异构网络(heterogeneous network, HetNet)的研究^[34-35]。在轨道通信系统中,通过将相互重叠的不同类型网络融合,可以满足未来城轨交通的业务多样性需求。目前存在一个服务对应一个网络架构的现象;为了能够同时接入多个网络,移动终端应当具备可以接入多个网络的接口,这便涉及在不同网络之间的切换问题。这种为各类业务建立不同独立网络的方式,无法实现城轨交通系统下多业务的综合承载,极大地增加了网络复杂性和建设维护成本,同时也不利于未来城轨交通业务的灵活发展。

4.2 协同控制与互联互通

当前城市轨道交通通信系统采用 T2G 双向通信结构,距离未来可能使用的基于 T2T 通信的列控系统还有很长一段路。在这一演进过程中,必然会存在 T2G 和 T2T 通信共存的局面。此时,T2G

和 T2T 通信的协同问题影响着列控系统的效率和安全。考虑到资源和能耗的有效利用,以及不同业务对时延和可靠性等性能的需求,应设计出一个恰当的协同通信方案,而不仅是将其中一种通信方式作为另一种的冗余手段。随着设备计算和通信能力的提高以及分布式或者非集中式思想的发展,多系统合作能够以更小的代价完成更复杂的任务这一理念开始被人们普遍认同。与单个系统相比,多系统架构,尤其是分布式多系统,具有很多明显的优点。因此在 T2T 通信场景下,可对多辆行驶方向、运行状态和路线一致的列车进行编队控制,从而更加有效安全地完成行驶任务。在完成多列车根据需求的分层式体系结构设计任务之后,多列车编队控制问题便转化为多辆列车之间行为的相互协作问题,即多列车之间相对运动状态控制问题的研究。而如何选择多列车之间的协同控制方案,也是一项具有挑战性的任务。

此外,由于城轨交通线路主要采用单线建设,运营的方式、设备供应商数目繁多,通信信号制式和接口种类并非统一,资源无法进行共享,各线路列车无法互联互通,城轨通信系统设备的种类、制式等都不尽相同。这给城轨系统带来了极高的维护成本与培训成本,无法为乘客带来良好

的乘坐体验。互联互通能够实现城轨列车跨线路运行,对应列车的通信、信号、运营商等解决方案能够协调统一。但是互联互通意味着,设备厂商需要进行协调一致,但这种协调非常困难,近乎不可能。另一种方案是在城轨系统内加装多套通信以及信号设备,但由于成本过于高昂,可实施性较低。统一规范标准的通信信号互联互通设备是未来发展的方向;基于统一规范标准,不但可以保护各个厂商的核心技术与知识产权,还可以形成良性循环的产业链,促进相关技术的发展。

4.3 安全与效率

轨道交通安全运营是轨道交通发展的重中之重,其永恒不变的主题包含绿色、安全和高效,但是轨道交通运营效率与安全本质上存在着一定程度的冲突。随着无线通信以及列车控制技术的不断发展,技术复杂度也不断提高。为了应对未来可预期的庞大客流,城轨交通列车也将不断提速,行车密度将不断增加,追踪间隔变短,因此对其运营效率提出了极高的发展要求,安全隐患也随之上升。由于任何系统出现非正常的情况都会导致全线列车的混乱甚至瘫痪,因此需要整个系统各子功能模块高度协作,这就要求在各类技术发展的同时加大安全系统设计力度并对其协作方式进行优化。

随着通信技术以及配套列控技术的不断发展和完善,城轨交通系统已经实现部分线路的全自动驾驶,未来智能城轨交通系统也将更大程度地采用自动控制、远程监控的驾驶模式。与此同时,故障监测和诊断技术也将随之不断提升,这就要求承载城轨列车数据传输的系统与时俱进,共同营造一种安全、可靠、智慧、互联的城轨交通系统。然而随着列车智能化、信息化的发展,信息安全方面的隐患也浮现;不法分子利用网络系统漏洞进行网络攻击,因此需要构筑一种信息安全防御体系,设置紧急恢复系统与安全冗余装置,

将信息安全隐患造成的风险降至最低,这对智能化、信息化城轨交通系统的发展也提出了一定的挑战。

5 结束语

新型通信技术的快速发展,为城市轨道交通开启万物互联的智慧轨道交通时代提供了重要的基础建设支撑。在此应用背景下,本文从城轨通信需求的多个角度出发,介绍了不同驱动因素下城轨通信技术的发展以及未来的演变趋势。同时分析了一些具有挑战性的可与“智慧城轨”结合的研究方向,包括 T2T 通信技术、MEC 技术、基于 MADRL 的通信资源分配技术和列车编队技术。通过采用新型通信技术与机器学习相关算法优化城轨通信系统,在合理的理论分析前提下,实现更可靠的数据传输与更高效的列车控制;在满足一些未来潜在轨道交通业务需求的同时,保持高质量的用户体验。此外,也对未来城轨交通发展的挑战进行了分析与讨论。基于新型通信技术与人工智能等技术的“智慧城轨”交通系统,将助力“智慧城市”的打造,推动相关产业换代升级。我国城轨交通向智能化发展势在必行。

参考文献:

- [1] SONG H F, SCHNIEDER E. Availability and performance analysis of train-to-train data communication system[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(7): 2786-2795.
- [2] JAHANZEB F, SOLER J. Radio communication for communications-based train control (CBTC): a tutorial and survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3): 1377-1402.
- [3] CHEN R, LONG W X, MAO G Q, et al. Development trends of mobile communication systems for railways[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 3131-3141.
- [4] 邵春海, 包峰. 全自动运行系统的兴起与未来之路[J]. 城市轨道交通, 2019(2): 18-19.
GAO C H, BAO F. The rise and future of fully automatic operation system[J]. China Metros, 2019(2): 18-19.
- [5] 宁滨, 邵春海, 李开成, 等. 中国城市轨道交通全自动运行



- 系统技术及应用[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(1): 1-6.
- NING B, GAO C H, LI K C, et al. Technology and application of fully automatic operation system for urban rail transit in China[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(1): 1-6.
- [6] ZHU L, YAO D Y, ZHAO H L. Reliability analysis of next-generation CBTC data communication systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(3): 2024-2034.
- [7] 鲁玉龙, 沈海燕, 解亚龙, 等. 边缘计算融合 NB-IoT 在高铁联调联试中的关键技术研究[J]. 中国设备工程, 2020(7): 175-177.
- LU Y L, SHEN H Y, XIE Y L, et al. Research on the key technology of edge computing fusion NB-IoT in high-speed rail joint test[J]. China Plant Engineering, 2020(7): 175-177.
- [8] 谢红霞, 孙林祥. 轨道交通车-地通信无线局域网技术应用[J]. 铁道通信信号, 2020, 56(2): 63-66.
- XIE H X, SUN L X. Application of WLAN technology for rail transit train-ground communication[J]. Railway Signalling & Communication, 2020, 56(2): 63-66.
- [9] 路向阳, 李东林, 李雷, 等. 智慧城轨下智慧车辆装备技术的研究与展望[J]. 机车电传动, 2018(6): 1-8.
- LU X Y, LI D L, LI L, et al. Study and prospect of equipment technology for smart rolling stock in smart urban rail transit system[J]. Electric Drive for Locomotives, 2018(6): 1-8.
- [10] MAO Q, HU F, HAO Q. Deep learning for intelligent wireless networks: a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 2595-2621.
- [11] LIU X, XU Y H, CHENG Y P, et al. A heterogeneous information fusion deep reinforcement learning for intelligent frequency selection of HF communication[J]. China Communications, 2018, 15(9): 73-84.
- [12] CUI Y, MARTIN U, ZHAO W T. Calibration of disturbance parameters in railway operational simulation based on reinforcement learning[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2016, 6(1): 1-12.
- [13] YANG Z P, ZHU F Q, LIN F. Deep-reinforcement-learning-based energy management strategy for supercapacitor energy storage systems in urban rail transit[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(2): 1150-1160.
- [14] ZHAO J H, ZHANG Y, NIE Y W, et al. Intelligent resource allocation for train-to-train communication: a multi-agent deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Access, 2020(8): 8032-8040.
- [15] 谭俊杰, 梁应敞. 面向智能通信的深度强化学习方法[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(2): 169-181.
- TAN J J, LIANG Y C. Deep reinforcement learning for intelligent communications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(2): 169-181.
- [16] WANG X X, LIU L J, ZHU L, et al. Train-centric CBTC meets age of information in train-to-train communications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(10): 4072-4085.
- [17] WANG X X, LIU L J, TANG T, et al. Enhancing communication-based train control systems through train-to-train communications[J]. Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(4): 1544-1561.
- [18] PASCOE R D, EICHORN T N. What is communication-based train control[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2009, 4(4): 16-21.
- [19] WANG H W, YU F R, JIANG H L. Modeling of radio channels with leaky coaxial cable for LTE-M based CBTC systems[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(5): 1038-1041.
- [20] ZHAO J H, LIU J, NI S J, et al. Enhancing transmission on hybrid precoding based train-to-train communication[J]. Mobile Networks and Applications, 2020, 25(5): 2082-2091.
- [21] 倪善金, 赵军辉. 5G 无线通信网络物理层关键技术[J]. 电信科学, 2015, 31(12): 48-53.
- NI S J, ZHAO J H. Key technologies in physical layer of 5G wireless communications network[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(12): 48-53.
- [22] ANDREAS L, STRANG T, RICO-GARCÍA C. A reliable surveillance strategy for an autonomous rail collision avoidance system[C]//Proceedings of the 15th ITS World Congress. New York: ACM Press, 2008.
- [23] 何芊颖. 基于 TSSM 的车车通信系统车载移动授权模块的建模和验证[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- HE Q Y. TSSM-based modeling and verification of VBTC MA unit in VOBTC[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [24] 徐纪康. 基于车-车通信的新型 CBTC 系统分析[J]. 铁道通信信号, 2014, 50(6): 78-80.
- XU J K. Analysis of a new CBTC system based on train-train communication[J]. Railway Signalling & Communication, 2014, 50(6): 78-80.
- [25] 林俊亭, 王晓明, 党垚, 等. 城市轨道交通列车碰撞防护系统设计与研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(2): 407-413.
- LIN J T, WANG X M, DANG Y, et al. Design and research of the improved train control system with collision avoidance system for urban mass transit[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(2): 407-413.
- [26] 郜城城, 周旭, 范鹏飞, 等. 移动边缘计算技术在高铁通信网络中的应用[J]. 计算机系统应用, 2018, 27(8): 56-62.
- GAO C C, ZHOU X, FAN P F, et al. Application of mobile edge computing technology in high speed rail communication network[J]. Computer Systems & Applications, 2018, 27(8): 56-62.
- [27] 李斌. 基于 MEC 的高速铁路无线通信网络优化方案[J]. 电信科学, 2019, 35(11): 88-95.
- LI B. Wireless communication network optimization scheme for high-speed railway based on MEC[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(11): 88-95.
- [28] HALTUF M. Shift rail JU from member state's point of view[J].

- Transportation Research Procedia, 2016(14): 1819-1828.
- [29] ZHANG J Y, BJÖRNSON E, MATTHAIIOU M, et al. Prospective multiple antenna technologies for beyond 5G[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(8): 1637-1660.
- [30] YAN L, FANG X M, WANG X B, et al. AI-enabled sub-6-GHz and mm-wave hybrid communications: considerations for use with future HSR wireless systems[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020, 15(3): 59-67.
- [31] 刘云毅, 赵军辉, 王传云. 高速铁路宽带无线通信系统越区切换技术[J]. 电信科学, 2017, 33(11): 37-46.
- LIU Y Y, ZHAO J H, WANG C Y. Handover technology in high-speed railway broadband wireless communication system[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(11): 37-46.
- [32] 艾渤, 章嘉懿, 何睿斯, 等. 面向智能高铁业务和应用的 5G 基础理论与关键技术[J]. 中国科学基金, 2020, 34(2): 133-141.
- AI B, ZHANG J Y, HE R S, et al. Fundamental theory and key technologies of 5G for service and application of intelligent high-speed railway[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2020, 34(2): 133-141.
- [33] SOLIMAN M, SIEMONS J, KOCHERS J, et al. Automatic train coupling: challenges and key enablers[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(9): 32-38.
- [34] ZHAO J H, NI S J, YANG L H, et al. Multiband cooperation for 5G HetNets: a promising network paradigm[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(4): 85-93.

- [35] MORENO J, RIERA J M, HARO L D, et al. A survey on future railway radio communications services: challenges and opportunities[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(10): 62-68.

[作者简介]



赵军辉 (1973—), 男, 博士, 北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师, 华东交通大学信息工程学院院长, 主要研究方向为 6G 移动通信、车联网、轨道交通无线通信、智能信息处理、物联网等。



张丹阳 (1996—), 男, 北京交通大学电子信息工程学院硕士生, 主要研究方向为轨道交通无线通信、移动边缘计算。



贺林 (1998—), 女, 北京交通大学电子信息工程学院硕士生, 主要研究方向为轨道交通无线通信、移动边缘计算。