



# 铁路新一代移动通信的挑战与思考

## Challenges and Perspective of New Generation of Railway Mobile Communications

钟章队 /ZHONG Zhangdui<sup>1,2,3</sup>, 官科 /GUAN Ke<sup>1,2,3</sup>,  
陈为 /CHEN Wei<sup>1,2,3</sup>, 艾渤 /AI Bo<sup>1,2,3</sup>

1. 北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 中国 北京 100044;
  2. 北京交通大学 宽带移动信息通信铁路行业重点实验室, 中国 北京 100044;
  3. 智慧高铁系统前沿科学中心, 中国 北京 100044)
- (1. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;  
2. Key Laboratory of Railway Industry of Broadband Mobile Information Communications, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;  
3. Frontiers Science Center for Smart High-Speed Railway System, Beijing 100044, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202104009

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20210722.1617.012.html>

网络出版日期: 2021-07-23

收稿日期: 2021-06-24

**摘要:** 铁路新一代移动通信将面向铁路全场景、全业务、全链接、强安全, 不仅有望完全取代既有系统, 还能为列车自动驾驶、列车安全视频监控等业务提供高速信息传输服务, 是铁路物联网的信息承载平台和高速铁路运行安全保障的基础。感知-通信-计算一体化、数智融合、新型阵列理论、新材料物理电磁特性为铁路新一代移动通信发展提供前沿应用基础理论支撑; “大智移云物”技术群、区块链技术、高精度无线网络规划与优化、建筑信息模型(BIM)与增强现实(AR)融合技术以及数字孪生将为铁路新一代移动通信发展提供技术保障。在当前和未来的落地应用中, 铁路新一代移动通信系统需要树立“可管、可控、可信、可视、可靠、可测”的六大设计理念, 需要解决频率资源有限和新需求不断涌现之间的矛盾, 高速移动性与可靠性问题, 以及综合轨道交通枢纽集群与场景独特性带来的挑战, 需要厘清在技术体制、公专共存、异构网络协同等方面存在的开放性问题。

**关键词:** 高速铁路; 5G; 新一代信息通信技术

**Abstract:** The new generation of railway mobile communications will be oriented to all railway scenarios, all services, all links, and strong security. It is expected to completely replace the existing system, and can provide high-data rate mobile channels enabling automatic train driving, train safety video monitoring, etc. Moreover, the new generation of railway mobile communications will be the information platform of the railway Internet of Things and the basis for the safety of high-speed railway operations. The integrated sensing, communication and computing, the digital intelligence fusion, the new array theory, and physical electromagnetic properties of new materials provide frontier applied basic theoretical support for the development of new generation of railway mobile communications; the technical group of “big data, artificial intelligence, mobile communication, and cloud computing”, the blockchain technology, the high-precision wireless network planning and optimization, as well as the fusion of building information model (BIM) and augmented reality (AR) will provide technical support for the development of the new generation of railway mobile communications. In the current and future implementation of the new generation of railway mobile communication systems, it is necessary to establish six design concepts of “manageability, controllability, credibility, visibility, reliability, and measurability”, and to address the challenges resulting from the contradiction between limited frequency resources and the continuous emergence of new demands, the high-speed mobility and reliability, as well as the comprehensive rail transit hub clusters and the uniqueness of scenarios. Last but not least, it is of importance to explore the open questions such as selection of technical systems, co-existence of public and dedicated networks, and heterogeneous network collaboration.

**Keywords:** high-speed railway; 5G; new generation of information and communication technology

### 1 发展铁路新一代移动通信的背景及意义

从 2016 年开始, 中国铁路进入高质量发展阶段。截至 2020 年底,

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费(智慧高铁系统前沿科学中心)(2020JBZD005); 国家自然科学基金(U1834210、61771036)

中国高铁运营里程达  $3.79 \times 10^4$  km, 稳居世界第一。城市轨道交通也成为国家大力发展的“新型基础设施建设”的重要领域。2019 年国务院发布《交通强国建设纲要》, 要求到 2035 年基本形成现代化综合交通体系; 2020 年中国国家铁路集团有限公司发布《新时代交通强国铁路先行规划纲要》,

提出到 2035 年形成  $7 \times 10^4$  km 的现代化高速铁路网, 率先建成智能高铁, 加快实现智慧铁路。与此同时, 世界各国也纷纷提出铁路数字化与智能化发展的战略规划。通过采用新一代信息通信技术来大幅提升铁路运输组织效率效益, 优化客货运输服务品质, 提高铁路运输安全水平, 已成为各国

铁路发展的必由之路。铁路智能化已经成为世界铁路未来发展的重要方向。

移动通信系统是列车行车安全、运营维护和旅客信息服务的中枢神经。目前,列车调度指挥、中国列车运行控制系统第3级(CTCS-3)列车运行控制信息、列车调度命令、无线车次号校核信息、信号设备动态监测信息等应用业务,都是由铁路窄带移动通信系统(GSM-R)来承载的。然而,GSM-R存在承载能力不足、频段干扰严重、生命周期正走向终结等问题;铁路宽带移动通信系统(LTE-R)在京沈高速铁路的实测显示,在450 MHz频段、5 MHz带宽和350 km/h的速度运行状态下小区边缘的传输速率仅为10 Mbit/s,无法满足未来智能高铁所需的全面态势感知、泛在互联以及智能快速决策的需求。智能高铁的行车和运营维护应用中的铁路多媒体调度通信、车载及轨旁高清视频监控、增强现实(AR)/虚拟现实(VR)远程检测及诊断、大规模传感器应用等,催生了新的列车运行控制及铁路安全相关业务、大带宽业务、铁路物联网业务,对铁路新一代移动通信系统的可靠性、频谱利用率、能量效率、带宽等均提出更高的要求<sup>[1]</sup>。

### 1.1 国际相关情况

铁路新一代移动通信技术得到业界的密切关注。国际铁路联盟(UIC)倡导铁路数字化转型,提出创建未来铁路移动通信系统(FRMCS),并且明确了针对铁路用户的六大类应用的通信需求,包括通信对象、带宽、时延、可靠性、速度等。除中国外的其他国家相关铁路实验室对铁路新一代移动通信保持开放的态度,虽未披露建设和发展规划,但已开始理论研究、技术论证和工程试验。

2019年9月,德国联邦铁路公司(DB)的5G列车移动实验室首次使用基于5G技术的设备对无人驾驶的列车进行远程控制测试,并在同年11月,开始研究从GSM-R向FRMCS的演进,并在汉堡市郊铁路进行5G铁路运营网试验,包括承载列车控制信息传输和自动驾驶试验;2019年11月,法国国家铁路公司(SNCF)与诺基亚公司签订合作伙伴协议,旨在共同创建5G铁路实验室,在实验室以及铁路环境中对FRMCS的性能进行全方位的评估,以便为铁路通信系统向更新、更高性能的无线通信标准过渡做准备;2020年3月,瑞士联邦铁路(SBB)在智能铁路4.0项目框架下,建立FRMCS的频段试点,旨在定义FRMCS的技术标准,并计划在2025年用FRMCS取代当前的GSM-R,以大幅提高铁路基础设施的安全性、可用性和生产效率;2019年,在西班牙巴塞罗那5G实验室(5G Barcelona)、加泰隆尼亚铁路(FGC)、加泰罗尼亚政府、巴塞罗那世界移动通信基金会(MWCapital)和沃达丰公司的共同合作下,西班牙建立5G铁路实验室,对铁路5G关键技术和应用进行研究和挖掘;2020年11月,由欧盟“地平线2020计划”资助的5GRAIL项目正式启动,旨在通过开发和测试用于轨旁基础设施和车载设备的FRMCS原型,验证首个FRMCS规范;2020年12月,日本移动通信公司(NTT Docomo)和JR东日本铁路公司,利用新干线ALFA-X试验车,成功实施360 km/h高速移动条件下的5G通信试验;2020年1月,韩国铁路研究所(KRRI)与SK电信(SK Telecom)签署技术合作协议以开发全球首个使用5G通信的智能列车控制系统,并在2020年底宣布基于5G列车自动控制技术的测试取得成功。

### 1.2 中国相关情况

当前,随着京张智能高铁、京雄智能高铁的开通,中国铁路正快速迈入智能化、智慧化阶段。在国家“交通强国”和“新基建”战略下,铁路信息通信技术融合发展成为趋势。2019年9月,中共中央、国务院印发了《交通强国建设纲要》,提出到2035年,基本建成交通强国,到21世纪中叶,全面建成人民满意、保障有力、世界前列的交通强国。作为《交通强国建设纲要》的细化和实化,2021年,中共中央、国务院印发了《国家综合立体交通网规划纲要》,提出到2035年基本建成规模约为 $70 \times 10^4$  km的现代化高质量国家综合立体交通网,其中,铁路约为 $2 \times 10^5$  km,是国家综合立体交通网的主干。交通运输部发布《关于推动交通运输领域新型基础设施建设的指导意见》(2020年8月,交规划发〔2020〕75号),提出到2035年,交通运输领域新型基础设施建设取得显著成效,泛在感知设施、先进传输网络、北斗时空信息服务在交通运输行业深度覆盖,行业数据中心和网络安全体系基本建立,智能列车、自动驾驶汽车、智能船舶等逐步应用。国铁集团发布《新时代交通强国铁路先行规划纲要》(2020年8月,国铁集团〔2020〕129号),提出到2035年,中国将率先建成服务安全优质、保障坚强有力、实力国际领先的现代化铁路强国;发布《国铁集团关于加快推进5G技术铁路应用发展的实施意见》(2020年8月,国铁集团铁发改〔2020〕144号),以推进铁路5G-R专网建设和5G公网应用;发布《智能高速铁路体系架构1.0》(2020年9月,国铁集团铁科信〔2020〕159号),从顶层设计出发制定智能高速铁路体系架构;发布《铁路5G技术应用科技攻关三年行动计划》(2020年

12月,国铁集团铁科信〔2020〕222号),提出到2023年完成铁路5G专网关键技术攻关和主要专用设备研制,开展安全保障、出行服务等领域急需业务试验验证和试用考核,完成5G专网主要技术标准制定,为开展铁路5G专网建设和业务应用奠定基础。

在国家各项政策引领下,新一代铁路信息通信系统的各类新应用对移动通信系统的带宽、时延、可靠性、安全性提出更高要求,大量应用对彼此之间的信息共享、专业互动提出新的要求,对建设统一信息通信平台提出新的需求。此外,铁路专用移动通信系统在承载业务、性能指标方面对可靠性和安全性要求较高,不同的业务需要灵活、动态的定制化设计和协同优化。针对有限的铁路专网频率资源,以及高速移动性对频谱效率与可靠性的影响,需要加快通信网络技术的跃迁,开展面向铁路全场景、全业务、全链接、强安全的铁路新一代移动通信技术研究。

## 2 铁路新一代移动通信技术

国际电信联盟无线电通信部门(ITU-R)在2017年6月发布的技术报告中,梳理了目前全球针对铁路新一代移动通信系统的研究工作。未来,如果要解决铁路高清晰度视频监控、基础设施安全隐患识别、运营控制系统的智能化等铁路安全运营的核心问题,铁路新一代移动通信系统不仅要满足传统的增强移动宽带(eMBB)需求,还要满足海量机器类通信(mMTC)和超可靠低时延通信(URLLC)需求。按照当前的发展趋势来看,以5G为代表的新兴无线通信技术无疑为铁路新一代移动通信系统的发展提供了全新动力。以5G为依托,铁路新一代移动通信系统可以在移动通信质量、接入设备数目、高数据速率可靠传输方面

得到进一步改进。除此之外,5G的出现与应用,可以帮助铁路新一代移动通信系统在获取卫星辅助数据、实时监测列车运行状态等方面取得进一步提升。铁路新一代移动通信系统的建设可实现高速移动场景下信息高效可靠传输,创建新型网络智能协同计算与信息分发体系,构建融合铁路物联网在内的全链接铁路信息通信网络,支持大容量数据传输及海量铁路设备接入,全面提升铁路信息通信系统的性能。

接下来,我们将从应用基础理论前沿、技术应用前沿、工程前沿3个层面介绍铁路新一代移动通信系统面临的机遇与挑战。

### 2.1 应用基础理论前沿

#### (1) 感知-通信-计算一体化

在信息传递过程中,感知-通信-计算一体化打破终端进行信息采集、网络进行信息传递和云边进行计算的烟囱式信息服务框架,可以同步构建信息采集与信息计算的端到端信息处理技术框架,有望支撑无人化、浸入式和数字孪生等感知通信计算高度耦合的智慧铁路业务。未来的智能高铁列车,有望建成感知(北斗、毫米波雷达、激光雷达、摄像头)、通信(5G、Wi-Fi 6、毫米波、物联网、可见光)、计算(列车大脑、多接入边缘计算)的一体平台,实现高铁移动装备、固定基础设施以及内外部环境间信息的全面感知、泛在互联、融合处理、主动学习、科学决策,实现全生命周期一体化管理的智能系统。

#### (2) 数智融合

数智融合是基于大数据与人工智能的融合,可实现数据感知、理解、推理、预测等能力。以铁路新一代移动通信系统为例,数智融合可以实时采集不同网元设备的数据,并对数据

进行实时处理、建模分析和预测,实现网元设备的优化配置,形成一整套闭环操作过程,最终实现网络智能管控和优化。此外,数智融合还可以实现多专业智能运维数据融合与统一分析,为智能高铁和智慧铁路搭建全方位运维智慧系统架构,为铁路行业实现数智化转型,提供重要支撑。

#### (3) 新型阵列理论

新型阵列理论通过引入更多的自由度来进一步提升铁路新一代移动通信系统的性能。例如,高速移动的列车会导致用户在较短时间内频繁切换小区,造成信号接收质量下降。引入大规模多输入多输出(Massive MIMO)技术<sup>[2]</sup>后,铁路沿线小区峰值吞吐率和平均吞吐率将得到提高。在此基础上,分布式Massive MIMO系统通过在铁路沿线多个分布式节点之间引入智能协作,实现资源的联合调度和数据的联合发送,有效消除干扰,增强接收信号质量,为列车上的用户提供稳定、可靠的服务。作为Massive MIMO系统的延伸,智能超表面(RIS),又被称为大型智能表面(LIS),可通过大规模的无源超表面阵列对电磁波进行控制。如果可以针对铁路场景的特点,形成利用RIS或LIS对不同电波传播机理进行调控的系统理论与关键技术,则铁路新一代移动通信系统的频谱效率和覆盖将得到提高,系统功耗将大幅降低。

#### (4) 新材料物理电磁特性

当前,列车车体主要由合金构成,对电磁波有较强的屏蔽作用,使车厢内无线覆盖面临严峻挑战。2018年9月,在德国举行的柏林国际轨道交通技术展(InnoTrans2018)上,中国中车股份有限公司正式发布新一代碳纤维地铁车辆CETROVO。与采用钢、铝合金等传统材料的列车相比,CETROVO整车重量降低了13%。由

此可见,未来以碳纤维、玻璃纤维等为代表的新型复合材料在列车上的占比会不断提升。如果在列车新材料的设计过程中,充分考虑材料的物理特性与电磁特性(如相对介电常数、电导率、散射系数、散射指数、透射损耗等)之间的作用机理与规律,则可在安全、舒适、节能、环保的基础上,增强列车显示、交互、通信、感知等能力,加强列车新材料在轨道交通智能化与智慧化发展中的作用。

## 2.2 技术应用前沿

如图1所示,本节将介绍由大数据、人工智能(AI)、5G移动通信、云计算、物联网构成的“大智移云物”技术群,以及区块链技术如何赋能铁路新一代移动通信系统,为列车运行安全、运营维护安全、施工建设安全等提供高质量的服务与保障。

### (1) 大数据

大数据技术主要是指针对海量数据进行采集、分析、处理以及应用的技术。在大数据技术的支撑下,运用AI技术,可以对轨道、路基等检测数据和业务数据进行智能分析,对关键指标的监测控制和动态预测,进而推动高铁智能化发展。

### (2) AI

将AI引入无线通信系统的各个层面,有助于解决无线通信系统中存在的问题,能大幅度提升无线通信系统的性能<sup>[3]</sup>。例如,基于视觉的智能检测需要多路高清视频传输支撑,然而目前铁路带宽较低,传统系统传输多为低清视频,无法满足智能检测的需求。引入AI技术,能够使低分辨率图像在占用相同的带宽资源下,提高无线智能通信系统接收图像分辨率,实现低带宽高清视频传输,极大提升检测精度,实现系统高精度的铁路入侵检测。

### (3) 5G 移动通信

5G移动通信技术可以实现高带宽、低时延和海量物联,能够改善现有高铁通信中存在的网络不稳定、网速慢、信号差等问题,为乘客提供更优质的服务。5G引入的毫米波技术<sup>[4]</sup>因其有较多的带宽资源,能够很好地解决当前6 GHz以下频段拥堵的问题,提高传输速率,减少时延。

### (4) 云计算

云计算超强的计算能力可以集中式地解决计算和储存问题,提高通信效率<sup>[5]</sup>。云计算技术与针对高铁的移动通信系统的融合,能够更快地处理数据,掌握列车的运营状态,及时发现故障并迅速处理,对智能高铁起到重要的支撑作用。

### (5) 物联网

在高铁场景中,需要维护的设施多、任务重,引入物联网技术则可以采集各类设备状态信息,并将信息回传至操作平台进行处理,以达到轨道交通能够智能监管各类设备的目的,

满足智慧高铁运维实时监测控制和远程维修维护等需求<sup>[6]</sup>。

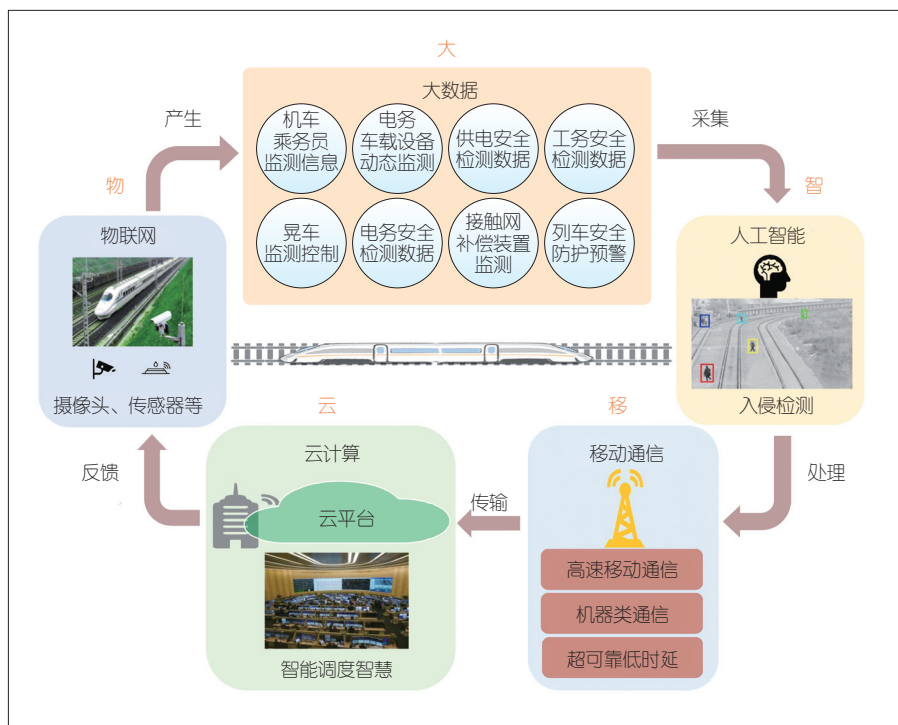
### (6) 区块链

区块链的去中心化和不可篡改等特性可为铁路新一代移动通信系统中的数据安全提供保障。例如,智慧高铁通信中物联网技术在网络层进行数据传递和处理,庞大的数据量和频繁的交互会导致在此过程中极易出现信息泄漏或篡改等问题。而将数据存储于区块链节点上,能够保证这些数据的完整性、保密性和真实性。

## 2.3 工程前沿

### (1) 工程设计的关键性能指标(KPI)与核心理念

与5G类似,铁路新一代移动通信系统设计的KPI包括:终端平均速率为10~100 Mbit/s(考虑10 MHz专网带宽),终端峰值速率达到200 Mbit/s(考虑10 MHz专网带宽),无线连接密度达到每千米 $1 \times 10^4$ 条无线连接,端到端时延达毫秒级,网络能量效率



▲图1 “大智移云物”技术路线赋能铁路新一代移动通信

较4G有10倍的提升,支持500 km/h的高铁速度。铁路新一代移动通信系统的设计将以智能调度指挥与列车控制为核心,从工程设计源头树立“可管、可控、可信、可视、可靠、可测”六大理念,支撑智能建造、智能装备、智能运营、智慧出行、智慧物流等智能高铁/智慧铁路应用,兼顾与其他通信网络的智能协同,实现全业务、全场景、全链接、强安全一体化设计。

(2) 高精度无线网络规划与优化  
准确、高效的无线网络规划与优化是移动通信系统高质量建设与发展的保障。现有的无线网络规划依靠人工判断与传播损耗经验模型,网络优化依靠反复路测以及人工调试,两者都存在精度差、效率低、时间长、开销大等问题,而且规划与优化彼此孤立,系统割裂,无法协同迭代,成为铁路移动通信建设和运维中的共性关键难题。此外,随着5G标准确定和更高频段无线网络建设的到来,铁路新一代移动通信系统在无线网络规划与优化方面会面临来自新频谱、新空口、新场景等多个方面的新要求与挑战。因此,自主知识产权、完全代码可控的高性能射线跟踪技术<sup>[7]</sup>、规划优化一体化技术、智能网络规划技术等关键核心技术亟待攻克,以便为铁路新一代移动通信系统高质量的无线网络规划与优化提供重要支撑。

(3) 面向铁路智能建造的建筑信息模型(BIM)与增强现实(AR)融合技术

相比于传统建筑,面向铁路“四电”(电力、电气化、信号和通信)的智能建造更加复杂。BIM是建筑三维模型和信息的数字化表达技术,而AR最突出的特点是具有虚实融合与人机交互功能。BIM与AR的融合技术,使工程师在面向铁路新一代移动通信系统时从设计、施工到运维管理都能

拥有高质高效的体验感,有助于压缩项目时间,保障全生命周期的可靠运行。未来BIM与AR融合技术必会随着移动端性能的提高和铁路新一代移动通信网络普及而逐步走向成熟,将会对铁路智能建造产生深刻的影响。而关于BIM模型轻量化处理问题、AR室内外的定位精度问题、多人协同管理等问题也将会是不小的挑战。

#### (4) 数字孪生

数字孪生技术是以数字化方式构建物理实体的虚拟实体,用于模拟、分析、验证、预测和控制物理实体全生命周期过程的技术方法。在新铁路的整体规划、设计方案和工程施工期内或重大升级时,工程项目数字孪生模型能够根据经营需求优化设计,并根据仿真模拟来降低施工期延误或管理不合规的风险。此外,工程项目数字孪生模型还可以优化供应链管理中的货运物流和沟通交流,进而保持施工进度和控制费用预算。例如,京雄城际铁路在施工过程中就大量采用了数字孪生技术。此外,基于数字孪生技术可以打造智能高速铁路车站大脑系统,在数据采集层,通过高清视频监控或物联网技术等,实现信息的感知,并在融合处理层,通过基础数据对车站运营场景进行建模、优化、决策等,最终实现智能调度和智能管理等核心功能,提高车站的感知、分析、管理能力,加快推进铁路智能化发展。

### 3 铁路新一代移动通信技术的应用

本节将介绍铁路新一代移动通信技术在当前和未来应用中面临的难点与开放性问题,以及值得开展的研究工作。

#### 3.1 难点

(1) 频率资源有限和新需求不断涌现之间的矛盾

一方面,随着越来越多的旅客选择铁路出行,大量移动高清视频、VR/AR/混合现实(MR)业务密集并发,使铁路场景成为典型的高密度、大容量热点区域;另一方面,随着自动驾驶、虚拟连接以及全天候(风、霜、雪、雨、雾、沙、霾、黑、光)环境(净空)感知等铁路智能装备关键技术的不断发展,车载传感器(激光雷达、毫米波雷达、视觉传感器等)的数量正在飞速增长,海量的感知数据也需要实现高效可靠传输。由此可见,发展智能高铁与智慧铁路将催生大量带宽密集型应用,需要更多的频率资源以支持海量数据的实时传输。而这与铁路移动通信非常有限的专网频率资源形成了尖锐的矛盾。因此,我们需要对未来铁路移动通信业务需求、系统需求进行梳理和预测,科学规划专网用频,增加频率资源;同时,注重厘清铁路业务需求的特征,对于不涉及铁路核心关键业务的需求,应考虑利用公网资源来增强铁路移动装备、基础设施和人员的泛在互联能力。

#### (2) 高速移动性与可靠性问题

高速移动性是高铁通信最鲜明的特征与挑战<sup>[8]</sup>。由于高铁列车的移动速度快,产生的多普勒效应会给高铁通信系统带来频偏,使接收信号不稳定,无线性能恶化;列车时速较高,用户在短时间内频繁进行小区切换与重选,会导致掉话率升高;高铁旅客较多且较为集中,也会导致网络负荷的升高,造成用户的信号质量下降;高铁的全封闭式结构也会造成严重的穿透损耗<sup>[9]</sup>。这些由于高速移动性和车体屏蔽性造成的影响,会对列车控制信号在车地之间的安全可靠传输造成威胁。因此,如何在高速移动条件下保证移动通信的有效性、可靠性,是铁路新一代通信系统亟须解决的痛点问题。对此,我们需要研究准确、

高效、低复杂度的多普勒频偏估计方法,使用纠偏、补偿技术降低频偏带来的影响;需要设计低时延、高成功率的小区切换技术和切换策略,为高速移动中的用户提供连续、稳定、高可靠的无线信号接入;需要设计低介电常数的新型复合材料,以减少金属车体对移动通信信号的屏蔽性。

### (3) 综合轨道交通枢纽集群与场景独特性带来的挑战

为了支撑和引导都市圈发展,中国提出打造轨道上的都市圈,加快发展智能轨道交通系统,推动干线铁路、城际铁路、市域(郊)铁路、城市轨道交通“四网融合”。综合轨道交通枢纽集群是发展四网融合的关键点,将最大限度地实现综合立体交通网络人流、物流、资金流和信息流的高效换乘、无缝对接、便捷流通。这意味着综合轨道交通枢纽集群将是多种交通方式、多种通信体制、多张无线网络的密集汇聚场所,并成为海量业务并发的超级热点区域。综合轨道交通枢纽集群智能化发展的最大困难,将是如何应对频率资源不足造成的多种无线通信系统之间、无线通信系统内不同用户之间的严重干扰,以及相应的网络性能下降、数据传输可靠性降低等问题。此外,铁路场景复杂而特色鲜明,包含车站、隧道、电力牵引架、路堑、横跨桥、明洞等特殊且不规则的结构体,加之在综合轨道交通枢纽集群中的密集人流、物流、车流,使电波传播呈现独特的损耗与衰落特性,并具有高度的空间异质性和频率依赖性。这导致长期使用的电波传播经验模型或解析模型,难以准确表征铁路场景,尤其是综合轨道交通枢纽集群中的电波传播与信道特性。因此,铁路新一代移动通信系统需要攻克高性能射线跟踪技术<sup>[8]</sup>、规划优化一体化技术、智能干扰消除技术等关键核

心技术,并将高质量的无线网络规划与优化融入综合轨道交通枢纽集群的设计、建造与运维过程中,以应对综合轨道交通枢纽集群与场景独特性带来的挑战。

## 3.2 开放性问题

### (1) 技术体制选择

第3代合作伙伴计划(3GPP)的R15标准仅有eMBB场景。URLLC与mMTC在R16中会得到完善,并在R17中获得进一步增强。而FRMCS需求在R16中才会有所体现,在R17中才能完善。因此,中国铁路发展的铁路新一代移动通信系统应至少基于R16版本,并具备向R17平滑演进的能力。

### (2) 公专共存路线

由于铁路专网频率资源受限,因此未来铁路部分对安全性、可靠性等要求相对较低的业务可以考虑借助运营商的5G公网进行承载。关于公网与专网的共存,大致可分为3种路线。第1种路线是异构技术的共存,即采用不同的架构、不同的技术向同一个业务方向发展。第2种路线是同构技术的共存,即公网与专网选用的基本技术体系是一样的。铁路研制的GSM-R、LTE-R技术体系,就是铁路与全球移动通信系统(GSM)、长期演进(LTE)技术的同构交融。在这一过程中,铁路进行了很多次改造和优化,以打造适合自身特殊发展需求的体系。第3种路线是运营层面、业务层面的共存,比如铁路在某些领域会直接用公网技术进行服务。这3种形式都会存在,其中同构共存或许会更受行业青睐,更能确保通信网络的信息安全。

### (3) 异构网络协同能力

铁路新一代移动通信系统要具备和其他网络协同的能力。Wi-Fi 6可

以作为铁路新一代移动通信网络在低速场景下的有效补充,可应用于VR/AR、路局办公、站段作业、教育培训、AI辅助等业务场景。基于北斗定位技术,结合铁路新一代移动通信网络的室内和室外定位功能,可以实现满足开阔地带、隧道和室内等多种场景定位需求的铁路全域定位。卫星通信网络可以作为铁路新一代移动通信网络的备份网络,有助于打造空天地一体化的铁路通信网络,实现对铁路常规通信、应急通信、临时施工通信等全场景的覆盖。打造基于60 GHz毫米波频谱的铁路车地传输专用网络,可实现超高速率的车载数据上传和下载,实现铁路6A、6C等车载数据的高速转储,以及车载旅客信息服务(PIS)视频数据的高速下发。第5代固网通信(F5G)是对铁路新一代移动通信网络的固网补充。结合F5G和铁路新一代移动通信网络的海量连接优势,有助于共同构筑铁路各专业的联接基石,构建铁路万物互联的智能世界。窄带物联网(NB-IoT)等移动物联网技术,是对铁路新一代移动通信物联网的补充,能够实现对铁路基础设施、移动装备、关键部件、货物、人员等的互联和感知。

## 4 结束语

铁路是国家战略性、先导性、关键性重大基础设施,是国民经济大动脉、重大民生工程和综合交通运输体系骨干,在经济社会发展中的地位和作用至关重要。发展智能高铁/智慧铁路是一个复杂的系统工程,需要围绕智能感知层、智能传输层、数据资源层、智能决策层、智能应用层等组成的产业链部署创新链,有针对性地开展科学研究、科技攻关与人才培养,推动创新链高效服务产业链;与此同时,还要围绕创新链布局产业链,实

现新一代信息通信技术创新成果的快速转移转化，并推动铁路产业结构转型升级。创新链与产业链互为支撑，形成促进中国铁路高质量发展的新动能。最后，产业链的可持续发展需要一个和谐生态圈。就铁路新一代移动通信发展而言，和谐生态圈应指遵循开放、有序、合作、共赢的原则，为铁路行业数字化、智能化发展创造更好的生态环境，让身处其中的各个成员共存共荣，最终实现整个链条及系统的和谐发展。为打造好深度融合的创新链、产业链、价值链，推动新一代信息通信技术与铁路深度融合，铁路新一代移动通信技术的研究与发展任重道远。

[5] 中国信息通信研究院. 云计算发展白皮书 [R]. 2020

[6] 艾渤, 马国玉, 钟章队. 智能高铁中的 5G 技术及应用 [J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(6): 42-47+54. DOI: 10.12142/ZTETJ.201906007

[7] HE D P, AI B, GUAN K, et al. The design and applications of high-performance ray-tracing simulation platform for 5G and beyond wireless communications: a tutorial [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2018, 21(1): 10-27. DOI: 10.1109/COMST.2018.2865724

[8] 魏航. 高铁专线智能优化关键技术分析 [EB/OL]. (2020-03-25)[2021-06-20]. <https://www.zte.com.cn/china/about/magazine/zte-technologies/2020/3-cn/4/8.html>

[9] 王凯. 5G 高铁覆盖, 为高速轨道交通打造宽带信息通道 [EB/OL]. (2020-05-14)[2021-06-20]. <https://www.zte.com.cn/china/about/magazine/zte-technologies/2020/5-cn/4/6.html>

作者简介



钟章队, 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室首席教授、博士生导师, 教育部“面向高速铁路控制的无线移动通信系统研究”创新团队带头人, 宽带移动通信与宽带移动通信、

计算机通信与信息技术等研究与教学; 1994 年提出基于 GSM-R 技术建设中国铁路数字移动通信网络, 奠定高速铁路 CTCS3 级列控系统发展基础; 完成 100 多项科研项目, 研究成果广泛应用于青藏铁路、大秦重载运输铁路、客运专线、高速铁路等工程建设; 获国家科技进步一等奖 1 项, 省部级科技特等奖 1 项、一等奖 3 项、二等奖 5 项, 中国图书优秀学术著作一等奖 1 项, 中国高等学校十大科技进展 1 项, 中国研究生教育成果奖二等奖 1 项, 中国电子学会优秀博士学位论文指导教师奖, 1998 年获铁道部有突出贡献的中青年科技专家称号, 1999 年享受国务院政府特殊津贴, 2004 年获茅以升科学技术奖(铁道科技奖), 2007 年获第八届詹天佑铁道科学技术贡献奖, 2010 年获得第十届詹天佑铁道科学技术成就奖。



官科, 北京交通大学教授、博士生导师, 轨道交通控制与安全国家重点实验室信息通信研究室副主任, 太赫兹通信标准《IEEE 802.15.3d-2017》的信道模型主创者, 《IEEE Vehicular Technology Magazine》《电波科学学报》等期刊的编委; 研究领域为 5G、毫米波/太赫兹以及智能轨道交通电波传播与无线信道; 获德国洪堡基金会外国科学家研究基金资助, 获国际无线电科学联盟 (URSI) 青年科学家奖、教育部高等学校科学研究优秀成果奖。



陈为, 北京交通大学教授、博士生导师, 轨道交通控制与安全国家重点实验室信息通信研究室副主任; 长期从事无线通信、信号处理、人工智能技术研究, 并围绕高维信息感知和处理、5G 海量机器类通信、物联网智慧信息采集和传输、智慧交通开展研究工作; 作为负责人承担省部级及以上项目 10 余项; 在高水平国际期刊和国际会议上发表论文 70 余篇, 包括期刊论文 20 篇。



艾渤, 北京交通大学教授、博士生导师、电子信息工程学院副院长, 轨道交通控制与安全国家重点实验室常务副主任, 国家 6G 技术研发总体专家组专家, 中国移动集团轨道交通联盟 5G 产业推进委员会主任, IET Fellow, IEEE VTS 杰出讲师, 中共中央组织部“万人计划”领军人才, 科技部中青年创新领军人才; 获国家自然科学基金委杰出青年基金、优秀青年基金, 以及国家自然科学基金委-英国皇家学会牛顿高级学者基金资助; 发表论文 150 余篇, 获授权发明专利 32 项。

参考文献

[1] AI B, MOLISCH A F, RUPP M, et al. 5G key technologies for smart railways [J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(6): 856-893. DOI: 10.1109/JPROC.2020.2988595

[2] 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

[3] ZHU J K, CHEN G, ZHANG S H, et al. Foundation study on wireless big data: concept, mining, learning and practices [J]. China communications, 2018, 15(12): 1-15. DOI: 10.12676/j.cc.2018.12.001

[4] HONG W, JIANG Z H, YU C, et al. The role of millimeter-wave technologies in 5G/6G wireless communications [J]. IEEE journal of microwave, 2021, 1(1): 101-122. DOI: 10.1109/JMW.2020.3035541