

智能高铁中的 5G 技术及应用

5G Technologies and Applications in High-Speed Railway

艾渤 /AI Bo, 马国玉 /MA Guoyu, 钟章队 /ZHONG Zhangdui

(北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044)

(State Key Lab of Rail Traffic Control & Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)



摘要: 介绍了面向智能高铁的 5G 场景及业务需求, 并针对场景及业务分析了适用于智能高速铁路的大规模天线 (MIMO)、超可靠低时延、大规模接入等 5G 关键技术。同时给出了 3 种智能高铁中的 5G 应用案例: 5G 智慧车站应用、5G 物联网应用以及 5G 移动边缘计算 (MEC) 应用。认为 5G 多种关键技术将会为未来实现高速铁路的智能升级提供了有力的支撑。

关键词: 高速铁路; 智能系统; 5G

Abstract: Based on the overview of the intelligent high-speed railway, the scenarios and business requirements of 5G for the intelligent high-speed railway are introduced. The 5G key technologies such as massive multiple-input multiple-output (MIMO), ultra-reliable low-latency communications, and massive access are also analyzed. Meanwhile, three 5G intelligent high-speed railway application cases, including railway station, 5G Internet of things application and 5G Mobile Edge Computing (MEC) application are presented. It concludes that 5G key technologies will provide strong support for the intelligent upgrade of high-speed railways in the future.

Keywords: high speed railway; intelligent system; 5G

DOI: 10.12142/ZTETJ.201906007

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20191221.1302.002.html>

网络出版日期: 2019-12-23

收稿日期: 2019-10-28

1 智能高铁概述

作为最具可持续性的交通运输模式, 高速铁路已成为国民经济大动脉和大众化交通工具, 是国家关键基础设施和重要基础产业, 对中国经济社会发展、民生改

善和国家安全起着不可替代的全局性支撑作用。同时, 由于信息技术突飞猛进, 智能化技术取得突破性进展。人类社会在经历了工业化、信息化之后必将向智能化时代迈进。在此背景下, 高速铁路需要采用云计算、物联网、大数据、人工智能、移动互联网、建筑信息模型 (BIM) 等先进技术, 通过持续技术创新, 推动铁路现代化、智能化水平大幅提高, 促进中国铁路向智慧铁路转型升级, 总体技术水平达到世界领先^[1]。

智能高速铁路由智能装备与运营、面向旅客的智能服务技术、智能建设 3 个方面构成。

(1) 智能装备与运营, 包括智能动车组、列车自动驾驶、智能供电系统、智能调度、智能防灾系统以及智能运营维护等。

(2) 面向旅客的智能服务技术: 包括智能服务设施、车站运营智能感知、车站设备智能监测控制与管理等。

(3) 智能建设: 包括智能高铁工程建设管理以及基础设施智能

基金项目: 国家重点研发—国家战略性国际合作重点专项项目 (2016YFE0200900)、国家重点研发计划重点专项子课题 (2016YFB1200102-04)、国家杰出青年科学基金项目 (61725101)、国家自然科学基金高铁联合基金重点项目 (U1834210)、北京海淀联合基金项目 (L172020)、北京市科委重点项目 (Z181100003218010)、牛顿高级研究学者基金 (61961130391)

检测监测等。

《综合轨道交通 5G 应用技术白皮书》指出,智能高速铁路是一个复杂的系统工程,以上 3 方面都离不开 5G 的泛在支持^[2]。5G 网络通过提供人人通信、人机通信和机器之间通信的多种方式,支持移动因特网和物联网的多种应用场景。面向高速铁路的 5G 技术不仅为行业用户也为商业用户提供高性能需求业务,在车地之间建立同时满足支持高速移动、高速率、高可靠、高实时(四高)的通信链路。因此,高速铁路场景成为 5G 的一个典型场景,并受到越来越多来自国际学术界和工业界的关注^[3-4]。

2 智能高铁的 5G 场景业务需求

随着中国铁路信息技术的发展,车地间通信的业务需求在不断拓展,移动视频监控控制、列车车况信息远程实时监测、优化控制和自动驾驶、智能列车、铁路物联网、旅客服务等各种新的业务需求不断涌现并日益迫切。此外,列车运行的环境有高架桥、山区、隧道、U 型槽等,场景的不同导致无线信道的特性有很大差异。因此,智能高速铁路通信具有业务类型和传输场景多样的特点,对 5G 的性能提出了很高的要求。

根据应用场景分类,智能高铁 5G 需求可分成 4 大类场景:铁路正线连续广域覆盖、铁路站场和枢纽等热点区域、铁路沿线地面基础设施监测、智能列车宽带应用。每种场景对通信的要求如表 1 所示。

根据业务类型分类,智能高铁

的 5G 需求可以分为 4 大业务属性:列控及运行相关业务、列车综合服务业务、铁路物联网业务以及旅客车载移动宽带接入业务。每种业务属性的业务名称如表 2 所示。

3 智能高铁中的 5G 关键技术

3.1 大规模天线技术

由于智能高铁场景中用户移动速度较快,传统蜂窝网络存在频繁小区切换问题,导致信号质量急剧下降乃至掉线,极大影响了用户体验。为了解决这一问题,分布式大规模天线技术有望成为较好的解决方案^[5]。如图 1 所示,分布式大规模多输入多输出(MIMO)系统将大量安装有一根或多根天线的接入点分布在轨道两侧,通过回程链路将数据传输到中央处理单元(CPU),利用相同的时频资源为多用户服

务。分布式大规模 MIMO 系统具有 3 个优势:首先,用户与部分接入点(AP)之间距离较近,可以降低大尺度衰落影响,带来宏分集增益,可以在轨道区域提供均匀、稳定、可靠的用户服务质量(QoS);另外,AP 成本较低,能够灵活部署,且由于每个 AP 的天线数量有限,其尺寸可以做得很小,灵活部署于空间受限的地点,如轨边电线杆等;最后,分布式大规模 MIMO 系统能够避免频繁蜂窝小区切换,减少控制信令交互,从而能够节省宝贵的无线资源,提升用户体验。

3.2 高可靠低时延技术

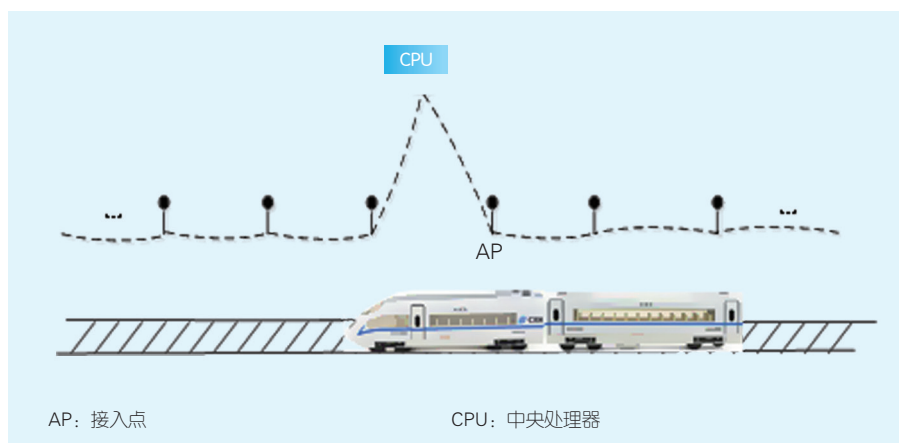
面向智能高铁的高可靠低时延通信(uRLLC)主要解决 3 个方面的无线通信业务传输需求,即服务于列控相关信号的车地无线信息传输、服务于旅客相关业务的车地

▼ 表 1 智能高铁 5G 应用场景分类

应用场景分类	特点
铁路正线连续广域覆盖	车地通信为主、广域、满足高速要求、优先级高
铁路站场和枢纽等热点地区	局域、速度低、业务类型丰富、业务量大
铁路沿线地面基础设施监测	静止、监测数据速率低、图像数据速率高
智能列车宽带应用	车区间为静止、数据量大;车地间为采用车站或出入库集中传输,速度低、数据量大

▼ 表 2 智能高铁 5G 业务属性

业务属性	业务名称
列控及运行相关业务	智能控制系统、车载高清视频监控控制系统、分布式应急通信、远程监测与故障诊断
列车综合服务业务	客运信息发布系统、定制化旅客服务系统、客运娱乐系统
铁路物联网业务	智能行车编组调度、乘务组动态调度、移动票务系统、旅客行李安防系统、货运管理信息系统、铁路集装箱联运系统
旅客车载移动宽带接入业务	商旅云办公、车载高清视频娱乐系统、车载即时通信系统、车载在线联机游戏、车内旅客社交网络、移动远程急救系统



▲ 图1 面向轨道交通场景的分布式大规模多输入多输出系统网络架构

无线信息传输和服务于设备小型化且分布式部署的设备间无线信息传输。支撑这3类业务的核心挑战来自于高速移动场景下信道环境的快速变化与传输可靠性、传输时延之间的矛盾，以及相对静止场景下高吞吐量、高可靠性与低时延的矛盾。

uRLLC的核心性能指标是信息传输可靠性，即误包率（PER）或分组错误率，以及端到端（E2E）的传输时延。目前无线通信系统设计的基础之一是香农信道容量，而香农信道容量刻画的是无穷长码长、渐进无误码传输的最大可达速率。从信息论的角度看，这一方面的工作仍需要投入大量深入的研究，包括不同基本通信模型下的传输可达速率、采用极化码或低密度对偶校验（LDPC）码等实际信道编码后的性能刻画；从信号处理和无线通信系统优化设计的角度看，需要基于有限码长编码的既有相关研究成果进行uRLLC系统的优化设计^[6]。此外，针对状态反馈控制系统，控制端往往仅需要最新的系统状态。为此，信息年龄（AoI）

可以用于uRLLC业务端到端时延的有效度量^[7]。目前，面向高速移动场景的uRLLC系统设计在基于有限码长编码、AoI 2个维度均开展了一系列研究，包括uRLLC数据包的联合调度与资源配置机制、空口端到端性能保障的上行与下行联合传输机制设计、面向信道估计误差的uRLLC鲁棒传输机制、基于混合自动重传请求（HARQ）传输机制的uRLLC传输包传输机制设计、uRLLC与增强移动宽带（eMBB）数据包的混合业务调度与传输机制设计等^[8-11]。

3.3 大规模接入技术

智能高铁场景复杂、区域分散，包含较多的出入口和围栏，因此需要大量的传感器节点才能实现无盲区覆盖。高铁车站作为重要的综合交通枢纽，包含诸多的无线通信使用场景，在车载视频、乘客信息服务、人工智能识别、等方面，5G接入技术将发挥巨大作用。

不同于语音通信和传统数据通信，海量机器类通信（mMTC）

作为5G的研究重点之一，具有大规模的设备数量、小数据包传输、低移动性、低活跃度及功耗受限的特点，是一种具有稀疏性的通信场景。传统的基于授权的随机接入方法具有繁琐的信令交互流程，这不仅会造成过多的时延，还会造成频谱资源的浪费。同时，传统方案中有限的前导码资源使大规模设备的冲突明显加剧，使接入成功率大大降低，并不能有效应对海量接入的场景^[12-13]。

基于压缩感知理论的免调度接入技术通过在媒体接入控制层设计新的接入协议，在物理层设计新的信号处理流程及帧结构，设计联合解决设备活跃度检测、信道估计及数据恢复的算法^[14]。媒体接入控制层接入协议设计如图2所示，活跃设备同时发送其分配的导频序列及小包数据，基站侧利用压缩感知相关算法实现多用户检测。在基站侧利用前导码进行活跃用户检测及信道估计，进而实现数据恢复。协议相比于长期演进（LTE）中传统的基于授权的随机接入方案减少了接入的步骤，可大大降低接入时延；同时，面对机器类通信小数据包的特性，可减少传输中控制信息的占比，以提高系统的频谱效率。物理层设计如图3所示，为不同设备分配非正交的前导码及扩频码，在相同前导码及扩频码长度下，可支持更多的接入过载，提高支持设备数量。同时，本技术考虑在数据帧内置设备识别码，以实现用户活跃度检测及数据恢复的校验功能，进一步地在算法设计中构成反馈机制。

这样一来,可避免非正交多址中串行干扰消除的错误泛化问题,增强基站在进行多用户检测时的抗干扰能力并提高接入成功率。免调度接入技术在成本、电池寿命和计算能力等条件约束下,可从支持设备的数量、接入成功率、接入时延等指

标上增强接入性能。

4 智能高铁中的 5G 应用

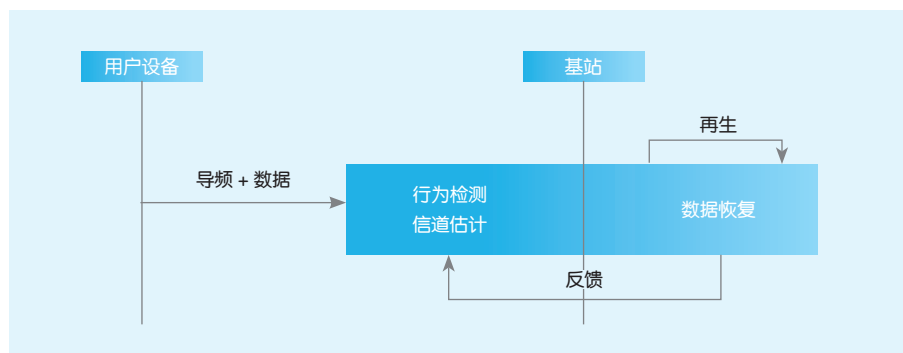
4.1 5G 智能高铁车站

高铁车站是 5G 智能高铁的一个重要室内应用场景,其移动通信

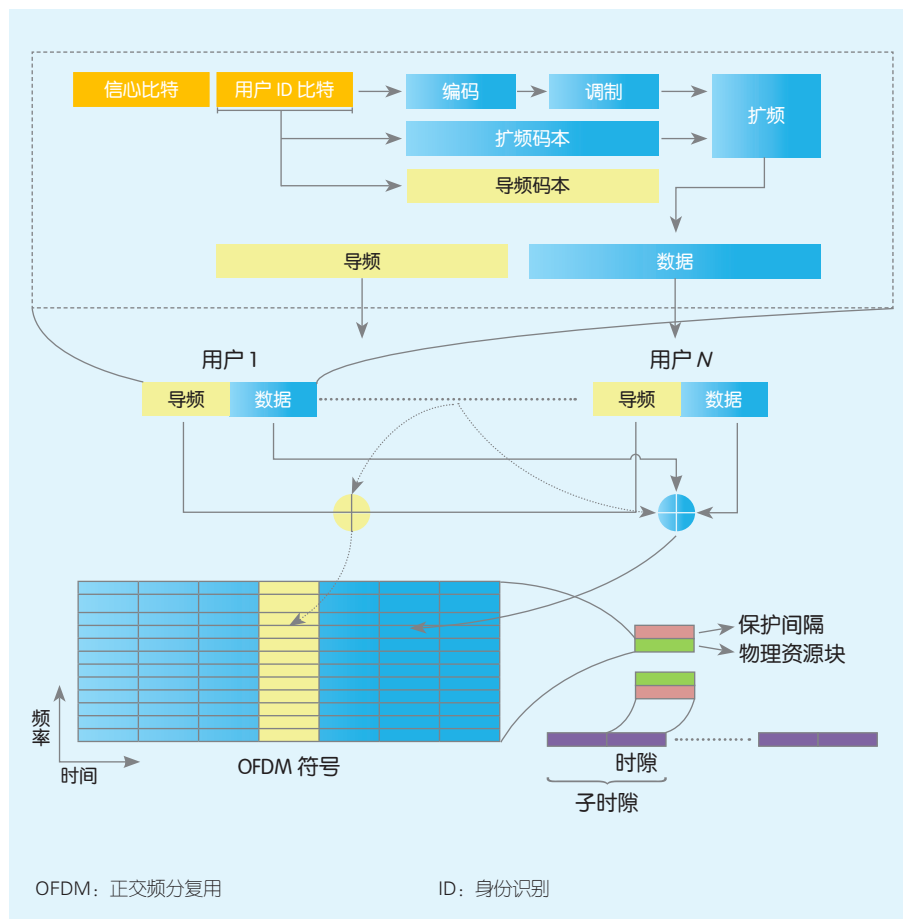
业务需求包含了室内导航、人员信息管理、视频通话、安全防范、站内运营、停车管理等。高铁车站大厅一般占地上万平方米,容纳多至上万人同时候车,数据流量密集;因而,需要考虑有效的室内覆盖及传输手段,保证终端在运行速度为静止状态或低速状态下的正常通信,使旅客享受到高速、便捷的 5G 网络服务^[15-16]。

目前,5G 室内数字系统(DIS)已应用于高铁火车站的智能化建设中,具体如图 4 所示。2019 年 2 月 18 日,上海移动正式在虹桥火车站启动 5G 网络建设,为全球首个采用 5G DIS 建设的火车站^[17]。

上海虹桥火车站是亚洲最大的交通枢纽之一,其每年的平均客流量超过 6 000 万人次,在旺季期间日客流超过 33 万人次。在 5G DIS 的支持下,虹桥火车站的峰值传输速率达到了 1.2 Gbit/s,实现了智能送餐机器人、导航问路、高清视频通话、云虚拟现实(VR)等多种新型应用。DIS 的典型特征包括有源天线、以太网光纤传输、可视化运维和服务多样化。其中,有源天线有助于在高低频实现大规模 MIMO 及 E2E 网络;以太网光纤传输相较于传统电缆传输不仅可以支持 5G 新频段,且占用空间较小,适合室内布置;可视化运维可以对海量的终端状态进行实时检测控制,从而实现自动化的网络资源分配、故障诊断及自我修复;服务多样化则可以满足室内移动终端提供多种通信服务需求。通过上述特征,DIS 可以完全满足服务增长、容量扩展、无缝覆



▲ 图 2 多媒体接入层接入协议



▲ 图 3 物理层信号处理流程

盖、可视化运维等 5G 网络的多维需求。

4.2 5G 物联网应用

5G 物联网应用是智能高铁中 5G 应用的一个重要应用形式,利用物联网技术和设备监测控制技术可以加强对高速铁路系统的信息管理和服务。高铁内需要维护的设施众多,维护任务繁重,可利用物联网技术采集各类设备状态信息,后通过 5G 网络接入回传到物联网操作平台处理。这样就可以解决以往数据回传网络存在的带宽及传输速率的限制,从而让轨道交通由被动维护变为了智能监管,可以实现高铁运维实时监测控制、高清视频监控控制、远程维修维护、物流跟踪管理,大大提高了整个轨道交通系统的维护效率和强化系统的安全性。

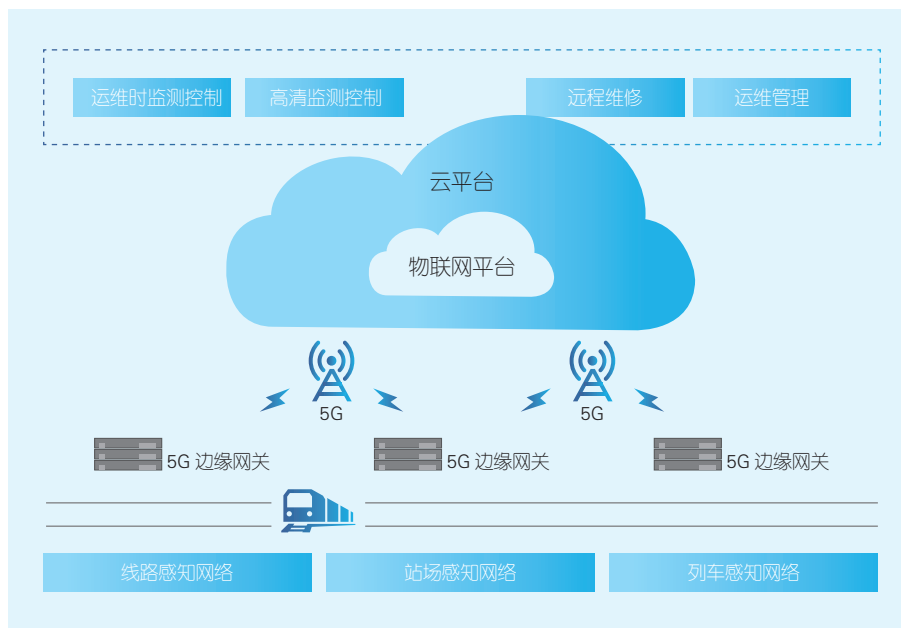
如图 5 所示,该应用技术方案为基于 5G+ 物联网技术的高铁智能运维技术架构,主要包括感知传感层、边缘接入层、基于云平台的物联网平台层、大数据及人工智能层和智能运维应用层 5 个层次。物联网感知层包括 3 个部分:基于人的监测检测信息感知、基于设备的监测检测信息感知以及基于环境的监测检测信息感知。边缘接入层是指通过 5G 边缘网关实现物联网各感知节点间的连接,从而实现云平台与边缘节点的协同,保障各种应用场景下感知信息通过 5G 网络回传的能力,具备关键业务本地处理的实时响应速度。物联网平台层提供的服务主要包括:连接管理、设备管理、统一接入网关、认证与鉴

权、消息管理、告警管理、规则引擎、安全审计、安全管理、报表统计、大数据对接和应用编程界面网关等。大数据云平台为物联网平台提供可以弹性扩展的数据存储、离线处理、流式在线处理能力,以及基本的分布式计算服务、流式计算

框架、分布式表格存储服务等,为系统应用提供高效、多维的数据支持。基于物联网技术的人、物、环的全面感知,通过 5G 网络实现感知信息的高效、稳定回传,利用基于云平台的物联网平台全面管理能力、大数据平台综合分析能力、人



▲ 图 4 基于 5G 的室内数字系统的智能高铁车站



▲ 图 5 5G 物联网技术在轨道交通智能运维的应用

工智能平台的智能处理能力,实现高铁的运维智能化。

4.3 5G 边缘 MEC 应用

在智能高铁中,视频业务、车辆网等应用场景对时延和带宽等传输质量具有很高的要求。现有网络架构中,终端到核心网之间传输距离过长会增大传输时延。尽管核心网侧能够提供较快的计算和较强的存储能力,但如果将大量业务数据全部上传至核心网侧进行处理,则会导致回传网络拥堵、资源竞争激烈,影响时延敏感性业务的传输质量。比起云计算,MEC 的传输时延更低,效率更高,数据管理成本更低,通过在本地为时延敏感性业务提供服务,以减少上传到核心网侧的数据量,缓解回传网通信压力。因此,通过在靠近终端侧位置部署 MEC 作为中心云的补充可以很好地解决上述问题,同时结合 5G 网络切片技术实现业务之间的安全隔离,就近为终端提供专用的网络和

应用资源。

轨道交通 MEC 应用如图 6 所示。通过部署 5G MEC 应用实现车路协同,可以实时获取列车周围的环境信息,将大部分的传输流量和计算负载整合到道路边缘层。例如,轨道实时视频监控控制,摄像可将其视频流就近上传至 MEC 做分析处理,识别轨道上的突发情况,并及时给列车下发合理的调度指令,以保障列车行驶安全。

在智能高铁的客运服务系统建设中,通过将部分客运服务系统功能部署到本地 MEC,为乘客提供云售票机或互联网取票机、智能客服机和云票务平台等新型的客运服务,满足乘客电子支付等新需求,提供更加便捷灵活的客运服务。类似地,可以在客运车站部署 MEC 来为乘客提供车站本地化服务。例如,车站智能安防可以通过视频监控控制分析关键区域人群,判断人员拥挤度。车站环境监测和控制可以通过物联网设备传感器采集环境

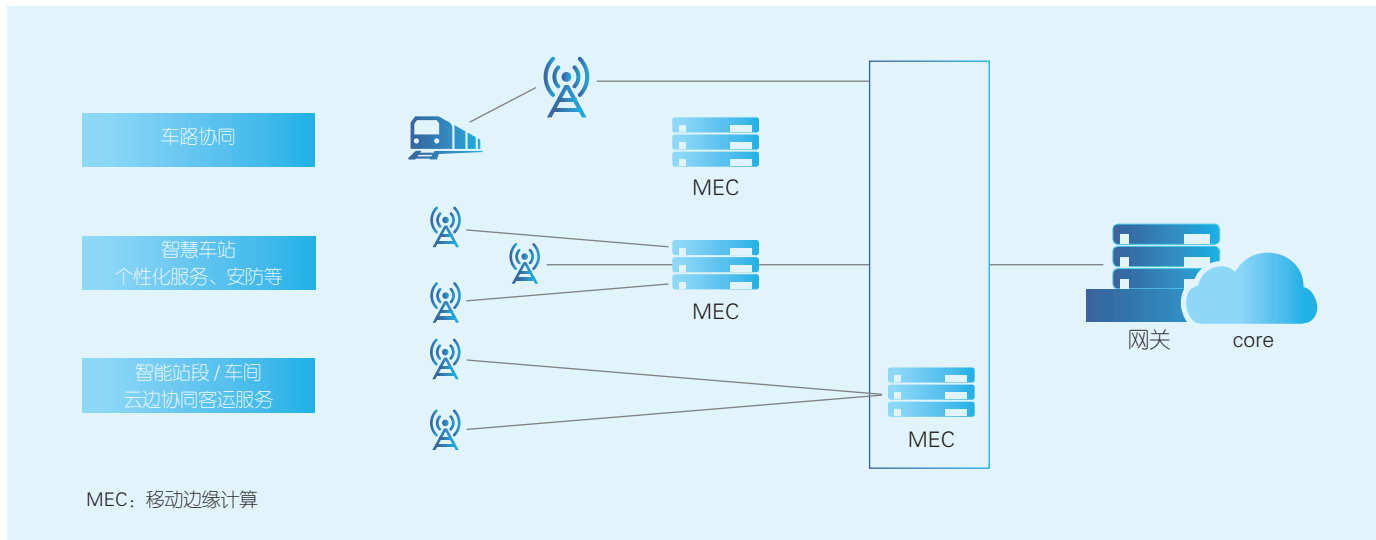
信息,然后根据环境信息进行设备自动控制、温湿度调节等。

在高铁轨道交通站段/车间,通过部署 MEC 应用可以实现区域化数据实时采集、存储和分析。例如,根据采集到的数据进行设备故障诊断,根据预先设定的报警机制,及时告警,并将故障信息反馈至本地车间。

5 结束语

本文中,我们介绍了面向智能高铁的 5G 场景及业务需求、适用于智能高速铁路的 5G 关键技术以及智能高铁 5G 应用案例。通过上述分析及介绍,可以看出 5G 关键技术在未来将会渗透到智能高铁的各个方面中,从而有力地支撑高铁智能化的实现。在未来的研究中,高速铁路的移动通信系统将继续考虑建立可信的通信网络,实现高移动速度下高数据速率的持续在线可靠传输以及实现网络、计算、存储

下转第 54 页 ➡



▲ 图 6 轨道交通 MEC 应用

真实、真切、及时的感受，信息接受的体验感及效果发生质的改变。配合与实时视频流，新闻信息多角度数据采集能力进一步强化，更大程度上增强了新闻现场的表现能力。如 2019 年两会现场，采用 5G+VR、5G+ 高清视频直播进行新闻报道，中国国际电视台（CGTN）在“一带一路”高峰论坛期间运用 AR 技术进行虚拟植入，打造沉浸式新闻现场体验；而其他国家的媒体，如谷歌、美国有线电视新闻网（CNN）、纽约时报都在自己的网

站上打造了 VR 平台，记者可以借助 VR 平台编辑和制作 VR 全景视频，用户也可以佩戴 VR 眼镜获得 360° 的全景新闻体验。

参考文献

- [1] 中华人民共和国科学技术部. 我国发布 5G 技术研发试验第三阶段测试结果[R]. 2019
- [2] 中国电信. 中国电信 5G 技术白皮书[R]. 2018
- [3] 董文. 谁无暴风劲雨时，守得云开见日出[J]. 通信世界, 2019, (3): 26
- [4] 中国首届云 VR 及云游戏产业论坛圆满召开 众咖热议：5G 加持，云 VR、云游戏大有可为[J]. 通信世界, 2019, (1): 34

上接第 47 页

资源的融合，推动智能高速铁路的进一步发展。

参考文献

- [1] 陆东福. 在中国铁路总公司工作会议上的报告[R]. 北京, 2019: 1-6
- [2] 钟章队, 艾渤, 陆平, 等. 综合轨道交通 5G 应用技术白皮书[R]. 北京, 2019: 1-95
- [3] HWANG I, SONG B, SOLIMAN S S. A Holistic View on Hyper-Dense Heterogeneous and Small Cell Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(6): 20. DOI:10.1109/mcom.2013.6525591
- [4] AI B, GUAN K, RUPP M, et al. Future Railway Services-Oriented Mobile Communications Network[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(10): 78. DOI:10.1109/mcom.2015.7295467
- [5] ZHANG J Y, CHEN S F, LIN Y, et al. Cell-Free Massive MIMO: A New Next-Generation Paradigm[J]. IEEE Access, 2019, (7): 99878. DOI:10.1109/access.2019.2930208
- [6] POLYANSKIY Y, POOR H V, VERDU S. Channel Coding Rate in the Finite Blocklength Regime[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(5): 2307. DOI:10.1109/tit.2010.2043769
- [7] KOSTA A, PAPPAS N, ANGELAKIS V. Age of Information: A New Concept, Metric, and Tool[J]. Foundations and Trends® in Networking, 2017, 12(3): 162. DOI:10.1561/13000000060
- [8] 成磊, 沈超, 夏树强. 上行-下行联合优化的 uRLLC 传输[J]. 中兴通讯技术, 2019 (1): 9
- [9] SUN X F, YAN S H, YANG N, et al. Short-Packet Downlink Transmission with Non-Orthogonal Multiple Access[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(7): 4550. DOI:10.1109/twc.2018.2827368
- [10] XU S F, CHANG T H, LIN S C, et al. Energy-

Efficient Packet Scheduling with Finite Blocklength Codes: Convexity Analysis and Efficient Algorithms[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(8): 5527. DOI:10.1109/twc.2016.2561273

- [11] XU Y Q, CAI D H, FANG F, et al. Outage Analysis and Power Allocation for HARQ-CC Enabled NOMA Downlink Transmission[C]//2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). USA: IEEE, 2018. DOI:10.1109/glocom.2018.8647914
- [12] SHARMA S K, WANG X B. Towards Massive Machine Type Communications in Ultra-Dense Cellular IoT Networks: Current Issues and Machine Learning-Assisted Solutions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019: 1. DOI:10.1109/comst.2019.2916177
- [13] MA G Y, AI B, WANG F G, et al. Coded Tandem Spreading Multiple Access for Massive Machine-Type Communications[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(2): 75. DOI:10.1109/mwc.2018.1700107
- [14] XIAO H, AI B, CHEN W. A Grant-Free Access and Data Recovery Method for Massive Machine-Type Communications[C]//ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC), May 20-24, 2019. Shanghai, China. New York, USA: IEEE, 2019. DOI:10.1109/icc.2019.8761393
- [15] AI B, BRISO-RODRIGUEZ C, CHENG X, et al. Challenges Toward Wireless Communications for High-Speed Railway[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(5): 2143. DOI:10.1109/tits.2014.2310771
- [16] AI B, GUAN K, HE R S, et al. On Indoor Millimeter Wave Massive MIMO Channels: Measurement and Simulation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(7): 1678. DOI:10.1109/jsac.2017.2698780
- [17] First 5G Digital Indoor System in Shanghai's Hongqiao Railway Station[EB/OL]. (2019-04-17)[2019-10-28]. <https://e.huawei.com/en/case-studies/global/2019/201904171449>

作者简介



赵子忠, 中国传媒大学新媒体研究院院长、教授、博士生导师, 新媒体学术领军人物; 主要致力于数字新媒体产业的研究, 包括数字内容产业、互联网产业、社会化媒体产业、广播电视产业、电信产业等。



张坤, 中国传媒大学新媒体研究院在读硕士研究生; 从事媒体融合和前沿媒体技术应用研究; 发表论文 2 篇。

作者简介



艾渤, 北京交通大学教授、轨道交通控制与安全国家重点实验室常务副主任, 国家杰出青年基金获得者, 国家优秀青年基金获得者; 主要研究方向为宽带移动通信和轨道交通专用移动通信; 曾获得求是杰出青年奖、教育部新世纪人才、詹天佑铁道科学技术奖以及北京市科技新星等奖项; 发表论文 300 余篇, 授权专利 26 项。



马国玉, 北京交通大学副教授; 主要研究方向为大规模物联网物理层技术; 曾获得 IEEE ICC 最佳论文奖; 发表 IEEE 论文 10 余篇, 授权发明专利 5 项, 美国专利 2 项。



钟章队, 北京交通大学教授、轨道交通控制与安全国家重点实验室首席教授; 主要研究方向为宽带移动通信和轨道交通专用移动通信; 曾获得茅以升科学技术奖、詹天佑铁道科学技术奖以及中国高校十大科技进展成就奖等; 发表论文 200 余篇, 出版学术专著 7 部。