



智能铁路新一代移动通信关键技术探索与展望

鲁玉龙¹, 沈海燕², 张俊尧¹, 杨兴磊¹, 解亚龙², 杨玲玲¹

(1. 北京经纬信息技术有限公司, 北京 100081;

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司电子计算技术研究所, 北京 100081)

摘要: 移动通信技术的进步驱动着各行各业的产业变革。铁路现有移动通信系统历经几十年的发展, 其承载能力越来越难以满足高速增长的现代铁路网建设步伐和智能化发展需求。基于智能铁路应用对移动通信带宽、时延、覆盖等需求和新一代移动通信面临的挑战, 开展新一代通信频谱技术、信道编码技术及多功能综合射频技术等新一代移动通信关键技术研究, 构建以“车-地、车-车、车-人”信息无缝协同交互为目标的“空天车地一体化”网络, 研究并展望通信-导航一体化、通信-计算-存储一体化在智能铁路中的场景应用, 提升铁路移动通信服务能力和效率, 赋能我国铁路智能化发展。

关键词: 智能铁路; 新一代移动通信; 空天车地一体化; 通信-导航一体化; 通信-计算-存储一体化

中图分类号: TP929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023002

Exploration and prospect of the key technologies of the new generation mobile communication of intelligent railway

LU Yulong¹, SHEN Haiyan², ZHANG Junyao¹, YANG Xinglei¹, XIE Yalong², YANG Lingling¹

1. Beijing Jingwei Information Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China

2. Institute of Computing Technology, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China

Abstract: The progress of mobile communication technology drives industrial changes in all walks of life. The carrying capacity of the existing railway mobile communication system is increasingly difficult to meet the rapid growth of modern railway networks even after decades of development. Based on the requirements of intelligent railway applications for mobile communication bandwidth, delay, coverage and other challenges faced by the new generation of mobile communication, the critical technologies of new-generation mobile communication were focused on, such as the new generation of communication spectrum technology, channel coding technology, and multi-functional integrated radio frequency technology. Additionally, an “air-space-vehicle-ground integration” network aiming at seamless collaborative interaction of information among “vehicle-ground, vehicle-vehicle, and vehicle-person” was constructed. Furthermore, the application of communication-navigation integration, and communication-computing-storage integration were studied and prospected in intelligent railways. It will play a vital role in improving the service capability and efficiency of

收稿日期: 2022-07-01; 修回日期: 2022-12-20

通信作者: 张俊尧, 526789224@qq.com

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司系统性重大项目 (No.P2021S005)

Foundation Item: Major Systematic Project of China National Railway Corporation (No.P2021S005)

railway mobile communication and enable the development of China's railway intelligence.

Key words: intelligent railway, new generation mobile communication, air-space-train-ground integration, communication-navigation integration, communication-computing-storage integration

0 引言

20 世纪 80 年代,移动通信 1G 时代逐渐进入大众视野,标志着人们可以进行远距离通信。随着大规模集成电路、微处理器与数字信号技术的逐步成熟,互联网时代数据通信呈现出的爆炸式增长需求促使移动通信技术不断变革。短短几十年间,移动通信实现从 1G 到 5G 的跨越式发展。通信技术的持续进步已经成为各行各业创新的先导力量,驱动着社会重要信息基础设施体系的变革和重塑。铁路作为我国经济大动脉、综合交通运输体系骨干,是国家最大的民生工程 and 传统基础设施行业。截止到 2021 年年底,我国高速铁路运营里程已超 4 万千米,稳居世界第一。2020 年中国国家铁路集团有限公司(以下简称“国铁集团”)发布《新时代交通强国铁路先行规划纲要》(铁发改〔2020〕129 号),指出到 2035 年,形成 7 万公里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。德国、法国、日本等高铁发达国家纷纷提出铁路数字化与智能化发展战略规划,采用新一代信息通信技术大幅提升铁路客货运输组织效率、效益和服务品质,从而提高铁路运输能力和安全水平。移动通信系统是列车运行安全、运营维护、客货运输等服务的“神经中枢”,探索铁路新一代移动通信技术已成为未来智能铁路发展的重要方向。

1 铁路移动通信现状、需求及面临的挑战

1.1 我国铁路移动通信现状

现阶段我国铁路移动通信系统主要包括 450 MHz 无线列调和 900 MHz 铁路移动通信系统(global system for mobile communications-railway, GSM-R),承载行车指挥、列控、安全、抢险、应

急等方面的信息和重要调度指令^[1]。450 MHz 无线列调采用制式落后的模拟对讲技术,主要用于既有普速铁路,工业和信息化部自 2012 年起停止相关产品的核准,大多数设备超期服役且面临无替代设备可用的风险,急需进行升级替代。GSM-R 是我国为满足高速铁路和既有线路改造的快速发展,基于数字窄带移动通信技术研发的铁路专用通信系统,系统带宽容量仅有 2×4 MHz,由于系统频段带宽有限,在实际使用过程中面临同频干扰、邻频干扰等问题,系统容量和业务承载能力已无法满足铁路日益增长的业务需求。

随着 5G 技术的发展和《国家 5G 应用“扬帆”行动计划(2021-2023 年)》(工信部联通信〔2021〕77 号)的出台,国铁集团相继发布《关于加快推进 5G 技术铁路应用发展的实施意见》(铁发改〔2020〕144 号)和《铁路 5G 技术应用科技攻关三年行动计划》(铁科信〔2020〕222 号),以推进铁路 5G-R 专网建设和 5G 公网应用,指出到 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、出行服务等领域紧急业务试验验证和试用考核,完成 5G 专网主要技术标准的制定,为铁路 5G 专网建设和业务应用奠定基础。2021 年 12 月,国家铁路局发布《“十四五”铁路科技创新规划》(国铁科法〔2021〕45 号),提出到 2025 年,不断完善智能铁路成套技术体系,实现 5G、北斗卫星导航系统、人工智能、大数据等信息技术在铁路更广泛、更成体系的应用。

2020 年 12 月,依托中国铁道科学研究院集团有限公司(以下简称铁科院)环行铁道试验基地,铁科院联合三大运营商及华为、中兴等 5G 设备厂商建设的“铁路 5G 创新实验室”已正式投入使用^[2],标志着 5G 技术在我国铁路创新应用领域迈出了



坚实的一步,为铁路新一代移动通信网络科研攻关、技术创新、标准制定、业务创新、测试试验和上道验证等多环节提供可靠、完备的试验环境。然而,由于5G公网占用频段较多且碎片化分配,铁路专用5G频段仍面临频段不足、批复困难等问题。

1.2 智能铁路通信技术应用需求

近年来在国家“新基建”战略的带动下,我国高速铁路建设里程不断增长,高速铁路智能化业务不断涌现,对铁路移动通信的应用需求不断扩大。在系统总结京张高铁、京雄城际的智能化创新实践基础上,国铁集团于2020年发布《智能高速铁路体系架构1.0》(铁科信(2020)159号),提出基于云计算、大数据、物联网、移动互联、人工智能、5G、北斗卫星导航系统、建筑信息模型(building information model, BIM)等新一代信息通信技术,实现高速铁路移动设备、基础设施及内外部环境间信息的全面感知、泛在互联、融合处理、主动学习和科学决策,建立全生命周期一体化管理的智能高速铁路系统。

王同军^[3]针对智能铁路体系架构中涉及的智慧工地、智能列控、智能车站、数字化货场等新业务,从业务应用场景进行分析,要求铁路新一代移动通信网络具备以下能力。

(1) 高带宽:具备超高通量带宽,满足基于BIM的虚拟建造、数字化竣工交付、动车组智能监控、站车客运服务等业务需求。

(2) 低时延:支持超低时延,满足列车运行控制、智能行车调度、列车自动驾驶(automatic train operation, ATO)、接近预警、超视距驾驶等车-地、车-车通信需求。

(3) 大连接:支持超大规模异构网络连接,满足智能化施工、基础设施检测监测、自然灾害监测与预警、周界入侵智能监测、环境智能监测等状态感知业务需求。

(4) 广覆盖:针对铁路线路线形特征,具备连续广覆盖能力,实现空天地一体化融合通信,

满足空天地一体化智能测绘、列车定位、移动装备监测和诊断、在途旅客动车组智能服务、智能综合检测车等车-地、车-车数据连续传输需求。

(5) 算网一体化:实现计算、存储、通信等多维资源一体化,满足动车组智能诊断、动车组智能运维、工电供一体化运维等智能化分析、评估决策的云边协同需求。

1.3 发展新一代移动通信面临的挑战

随着“智能京张”“数字京雄”等开通运营,中国铁路正迈入数字化、智能化阶段,现有移动通信系统业务承载能力不足的问题凸显。针对铁路专网有限的频率资源,以及高速移动对频谱效率、可靠性等方面的影响,开展铁路新一代移动通信技术研究仍面临诸多挑战。

(1) 铁路移动通信技术迭代的需要

随着公网GSM逐步退网,GSM-R设备厂商将逐步停止设备生产及技术支持,产业后续支撑和保障能力将大幅度缩减,铁路移动通信面临技术断层的风险,急需加快铁路新一代移动通信相关技术研究。

(2) 有限的频谱资源与不断增长的智能化业务之间的矛盾

现行的铁路数字移动通信系统上下行各4 MHz频谱带宽,仅支持语音通话、短消息、低速通用分组无线业务(general packet radio service, GPRS)数据传输等功能,业务承载能力有限。《智能高速铁路体系架构1.0》提出了我国智能铁路发展的“三大板块、十大领域、十八个方向、N项创新”,由此催生大量的带宽密集型业务应用,需要更多的频谱资源支撑海量数据的实时传输。国铁集团在《关于加快推进5G技术铁路应用发展的实施意见》中提出申请2 100 MHz作为5G-R专网工作频率,并明确现有频率逐步腾退方案。孙昱^[4]针对国内运营商及相关行业应用5G频谱资源的具体分配情况进行了分析,考虑到智能业务应用对带宽、时延等的需求,需要对未来铁路移动通信

业务进行梳理和预测,科学规划专网频段的使用,同时研究其他频谱资源替代方案。

(3) 高速移动场景下信号连续性与可靠性问题

高速移动性是高铁的鲜明特征,高铁列车快速移动过程中多普勒效应更加明显,会造成移动通信系统信号接收不稳定,无线性能下降。高铁列车作为一个用户相对集中的移动空间,用户终端在短时间内频繁切换小区,会导致信号质量不佳、话务中断。同时,旅客在行程中的上网业务也会在短时间内加剧网络负荷的升高,从而导致信号质量下降。因此,如何在高速移动场景下保证移动通信的信号连续性与可靠性,是铁路新一代移动通信系统需要解决的难点。

(4) 车载系统众多与车上空间受限之间的矛盾

高铁列车是一个集成化、系统化、信息化的“集合体”,仅涉及行车控制、定位追踪、故障诊断、旅客服务等与行车相关的信息通信系统就有 10 余个,这些系统大多在列车上部署有车载移动台、服务器或天线单元。由于彼此间制式不同,众多辐射源集中在空间有限的车厢内,易出现射频干扰、电磁干扰等问题。同时,“烟囱式”系统不但设备繁多、结构复杂,各系统射频资源无法共享,难以进行统一调度管理,而且非模块化设计造成的功耗、成本较高,增大了保养难度,给运营管理带来极大困难。

2 铁路新一代移动通信关键技术

针对第 1 节中铁路有限的频谱资源与不断增长的智能化业务之间的矛盾、高速移动场景下信号连续性与可靠性问题、车载系统众多与车上空间受限之间的矛盾,本文将从新频谱技术、新型信道编码技术和车载多功能综合射频技术 3 个方面进行阐述。

2.1 新频谱技术

频谱是移动通信运行的基础,是“看不见”的稀缺资源。随着智能铁路业务需求的持续增长,

未来铁路移动通信系统需要不断拓展可用的频谱资源。本文将从解决铁路移动通信频谱资源有限的问题出发,介绍太赫兹(THz)通信、可见光通信(visible light communication, VLC)、高效频谱共享技术和大规模天线阵列技术等新频谱技术。

2.1.1 太赫兹通信

太赫兹波的工作频谱为 0.1~10 THz,是介于微波与远红外光之间的电磁波,工作在此频段的太赫兹通信具有频谱资源丰富、传输速率高等优势,是未来移动通信中极具优势的无线接入(Tbit/s 级通信)技术^[5]。在 2018 年 9 月举办的美国移动通信世界大会上,美国联邦通信委员会专员 Jessica Rosenworcel 表示,未来 6G 可以采用基于太赫兹频谱的网络和空间复用技术。

太赫兹通信相比传统的微波、毫米波通信和无线光通信拥有许多优势,其在未来高速短距移动通信、高带宽无线通信以及近地空间通信等方面具有广阔的发展前景。

- 太赫兹通信波束更窄、方向性更强,具有更强的抗干扰能力,可实现更安全的加密通信。
- 太赫兹波的频率高、带宽高,Tbit/s 量级的通信速率使其能够满足无线传输时的高带宽需求。
- 星间链路通信。在外层空间,太赫兹波在 340 GHz、410 GHz 和 667 GHz 3 个信道存在窗口区,传输损耗极低,信号不易被展宽^[6]。相比无线光通信,太赫兹通信具有波束更宽、卫星天线接收端更容易对准、天线小型化等特点。因此,将太赫兹波用于星间链路的宽带通信是非常合适的。
- 太赫兹波的波长短、能量效率高、穿透性强,适合采用天线阵子更密集的大规模多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)技术。大规模 MIMO 的波束成形及空间复用增益能够克服太赫兹波在空气



中传输的大气衰落和雨衰等问题,满足小范围内高密集人口区域,如车站、楼宇等的覆盖需求。

国际电信联盟(International Telecommunications Union, ITU)已决定将 0.12 THz 和 0.2 THz 划归无线通信使用,但 0.3 THz 以上频谱的监管规则尚不明晰,全球范围内尚未统一。结合“交通强国”战略,以及 CR450、超级磁悬浮等科技创新项目以及智能铁路高带宽、低时延的通信需求,铁路新一代移动通信要在频谱资源的利用上实现技术革新。

2.1.2 可见光通信

另一种弥补现有无线通信频谱资源不足的技术是可见光通信,其原理是将发光二极管(light-emitting diode, LED)产生的可见光波段的光作为信息载体,而不需要光纤等有线信道的传输介质,在空气中直接传输光信号,从而达到照明和高速数据通信双重目的^[7]。

可见光波长范围为 380~780 nm,属于新频谱资源。与传统基于电磁波的无线通信相比,频谱使用不受限制,不需要无线电监管机构的授权,可以提供大量潜在的可用频谱。可见光通信的传输媒介是可见光,具有不能穿透墙壁等遮挡物的特性,因此传输范围限制在用户的视距范围内,即只要在室内等封闭空间,传输的信息就不会泄露到室外,避免被外部恶意截获,确保传输信息的安全性。此外,可见光通信不产生电磁波,没有电磁辐射,也不易受到外部电磁干扰,因此非常适合电磁环境恶劣的场合,如高铁车厢、医院、加油站等。可见光通信可以与 Wi-Fi、蜂窝移动网络(4G、5G)等现有通信技术进行异构网络融合,灵活快捷地组建临时网络与通信链路,通过“光—电”转换,将信息调制成 LED 光源发射到用户终端,实现高速率、高安全性的无线光接入。

现阶段我国“可见光通信系统关键技术研究”已获得重大突破,实时通信速率已达到 50 Gbit/s^[8]。

未来随着高调制带宽 LED 光源器件、光学 MIMO 与正交频分复用(orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM)技术、高灵敏度广角接收技术等创新突破,可见光通信在高铁出行、智慧城市(家庭)等领域将带来巨大的创新应用和价值体验。

2.1.3 高效频谱共享技术

我国蜂窝移动网络主要采用授权载波的方式,由工业和信息化部无线电管理局、国家无线电监测中心(国家无线电频谱管理中心)进行无线电分配、监测和频谱管理等工作,频谱资源实行有偿使用制度,因此频谱资源所有者独占使用权限。这种方式在频谱资源相对富余的 2G、3G 时代,能够有效避免系统间干扰。随着移动数据业务量的激增,独占频谱造成的频谱闲置、利用不充分等问题,加剧了频谱供需矛盾,使得运营商不得不加速 2G、3G 退网,重耕频谱以满足 5G 网络覆盖。

为满足未来铁路专用移动通信系统频谱资源的使用需求,一方面,采用太赫兹和可见光等新频谱技术进行扩展;另一方面,基于现有频谱使用规则,改变目前授权载波的使用方式,以更灵活的方式分配和使用频谱。动态频谱使用技术能够有效提升现有频谱利用率,通常包括动态频谱接入和动态频谱共享等方式^[9]。由于大量的授权频谱在时间和空间上未得到充分利用,用户可以利用动态频谱接入技术搜索空闲频谱波段,短时租用信道进行信息传输,但现有动态频谱接入协议尚且无法满足复杂多变的实际场景。而动态频谱共享可以根据自身业务状况实现不同制式网络在同一频段内动态、灵活地申请和释放频谱资源,从而大幅提升整体频谱利用率。未来铁路移动通信系统可以引入动态频谱使用技术,实现公用/专用网络和频谱资源的共建共享。

2.1.4 大规模天线阵列技术

我国 GSM-R 系统网络沿铁路线方向进行基

站建站,基站铁塔安装定向天线进行覆盖,众多椭圆形小区接续覆盖,由于频谱资源紧张,线状覆盖的小区采用频率复用,存在同频干扰、邻频干扰等问题。MIMO技术在充分利用现有频谱资源的基础上,利用空间资源获取可靠性与有效性,是未来移动通信系统提高频谱效率的关键技术之一。

通过引入大规模MIMO系统,利用基站侧配置的大规模天线阵列,建立多个信道,可以极大地扩充信道容量,服务小区中的若干用户^[10]。未来铁路新一代通信频谱采用的频段波长相对较短,可以在有限空间的天线内部部署更多的天线阵子,非常适合大规模MIMO技术的应用。另外,大规模MIMO可以结合波束成形技术补偿波长较短带来的传播损耗,缓解覆盖相对受限的问题。对于波束成形技术,全数字波束成形具有精度高、灵活、响应及时等优点,但是对基带处理能力要求高、系统复杂、成本高。模拟波束成形虽然基带处理的数据量小,但是受器件精度的约束较大,性能不佳,因此实际部署中通常采用折中的模数混合波束成形方案^[11]。针对铁路业务场景需求,大规模MIMO+波束成形技术可以提供差异化覆盖,从而获得超高速传输速率和较大覆盖范围,铁路大规模MIMO+波束成形差异化覆盖场景如图1所示。



图1 铁路大规模MIMO+波束成形差异化覆盖场景

2.2 新型信道编码技术

信道编码是移动通信的基础,在数字通信传输中外界干扰会产生误码,从而使接收到的信息出现缺失,导致图像卡顿、不连续、马赛克等问题。信道编码对数据流进行相应的处理,使其具有一定的抗干扰能力和纠错能力,进而提高数据传输效率,避免传输过程中误码的发生,因此降

低误码率是信道编码的核心任务。常见的误码处理技术有纠错、交织、线性内插等。信道编码的本质是增加通信的可靠性,在源数据流中插入特定码元,使数据在到达接收方时能够进行判错和纠错。

香农定理描述了信道容量与信道带宽、信噪比之间的关系,其表达式为 $C=B \cdot \lg(1+S/N)$, 其中 C 是信道支持的最大速率(也叫信道容量), B 是信道带宽, S 是平均信号功率, N 是平均噪声功率, S/N 即信噪比。香农公式给出了信道容量的极限,即实际无线制式中单信道容量不能超过该极限,只能尽量接近该极限。1993年,法国电机工程师 Berrou 和 Glavieux 通过迭代译码的办法发明了 Turbo 码,使得信道编码效率接近香农极限,开创了通信编码史革命性的时代。随后,全世界各大通信厂商和运营商开始对 Turbo 码进行深入研究。5G时代的来临,针对超高速率、超低时延等场景需求,采用迭代译码的 Turbo 码遇到瓶颈,因此,需求催动技术的演进,出现了新的信道编码: Polar 码和低密度奇偶校验(low density parity check, LDPC)码。由于这两种编码的性能均非常逼近香农极限,于是在2016年10月的3GPP里斯本会议以及11月的里诺会议上,针对增强型移动宽带(enhanced mobile broadband, eMBB)应用场景,确定将LDPC码作为eMBB数据信道的编码方案, Polar 码作为eMBB控制信道的编码方案^[12]。

未来铁路新一代移动通信系统将以“车-地、车-车、车-人”信息无缝协同交互为目标,实现任何人(whoever)在任何时间(whenever)、任何地点(wherever)以任何方式(whatever)同任何人(whomever)进行通信。信道编码技术的选择不仅要考虑铁路行业移动通信系统的建设和应用特点,还要考虑与公网体系的兼容性。同时,考虑到下一代通信系统(B5G/6G)将采用宽带卫星通信技术,新的信道编码技术既要能够有效地与地面通信网络进行融合,又要具备星地链路间



高速数据传输、抗衰落、抗干扰及高效频谱利用等能力,从而提高新一代移动通信系统的信道可靠性,实现高质量通信。

2.3 车载多功能综合射频技术

我国高速铁路列车的车载信息通信系统主要包含如下几种系统:用于列车调度通信的 GSM-R;用于列车定位及识别的应答器传输系统^[13];用于提供旅客无线局域网共享上网的高铁动车 Wi-Fi 系统;面向铁路设计期、施工期以及运维期,在工程测量、智慧工地系统、“一带一路”中欧班列集装箱定位跟踪、高铁列控系统等九大铁路业务板块的车载北斗卫星导航系统^[14];利用 4G/5G 公网进行车地数据传输的信息系统,如动车组故障预测与健康管理系统 (prognostics and health management, PHM) 系统^[15]。这些系统部署有独立的车载移动台、服务器或天线单元,众多辐射源集中在空间有限的车厢内,易出现射频干扰、电磁干扰等问题,并且各系统射频资源无法共享,难以进行统一调度管理。

针对车载各系统分散、独立的架构现状,结合高速列车实际运行环境,需要研究设计一套软件定义化、模块化、可持续升级的车载多功能射频系统架构,实现铁路新一代移动通信无线射频资源的合理调度管理。车载多功能射频系统架构如图 2 所示。综合射频技术的概念主要来自现代海军舰艇的舰载雷达系统^[16],指利用较少的分布

式宽带多功能天线取代数量众多的常规天线,将模块化、开放式、可重构的射频传感器系统体系架构与功能控制、资源管理调度算法、软件编程等结合,与通信、导航、识别等多种射频功能实现资源共享。

在高铁列车上应用综合射频技术,需要克服以下几个难点。

(1) 一体化集成天线技术

一体化集成天线^[17]是综合射频技术不可或缺的条件,与传统射频天线相比,一体化集成天线可消除天线数量、种类过多导致的空间占用多、布局杂乱等缺点。其利用宽带多波束技术将多个功能的天线模块集成在一个天线阵列中,从而提升车载天线的电磁兼容性和优化射频配置管理。

(2) 射频综合处理技术

射频通道的主要任务是完成无线射频信号的收发,射频通道是实现一体化集成天线的基础。由于车上各信息通信系统对射频指标的需求不同,车载综合射频系统需要满足不同功能模式下频段、带宽、覆盖范围、电磁环境等综合因素的需求,解决模拟与数字电路集成问题,并具备可重构、可扩展的能力。目前各系统采用独立的射频通道满足不同功能的需求,不仅增加了系统复杂度,也降低了可维护性。杨心武^[18]基于微波光子技术的宽带、低损耗、高射频隔离度和强并行处理能力等优势,开展综合射频系统在可重构分

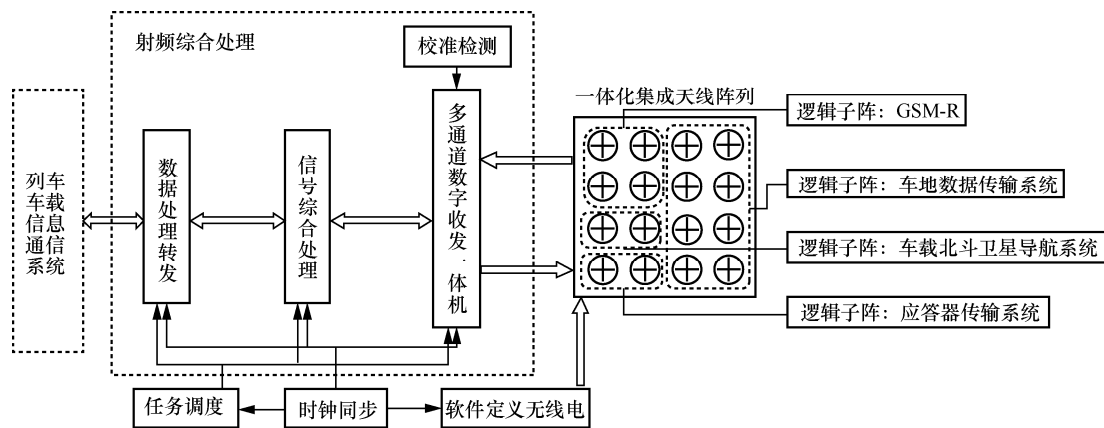


图2 车载多功能射频系统架构

布式天线系统与通信卫星转发器方面的应用研究,实现了统一通道下多信号的频率重构、路由重构以及大容量射频资源的灵活调配。

(3) 高速数据处理技术

综合射频系统要根据通信、定位、导航、车地数据传输等不同信息通信系统业务需求产生大量自适应数字波束,对各业务系统产生的多源异构数据进行快速并行计算。由此,多功能综合射频系统不仅需要具备在瞬时带宽下超强的数据处理能力,还需根据不同的业务类型进行实时的数据转换和分发。车载移动边缘计算(mobile edge computing, MEC)系统的概念最初是为了满足汽车自动驾驶需求而提出的,其能够提供实时处理且足够强大的运算能力。在高铁列车上引入MEC,并融合铁路新一代通信技术、人工智能技术(如深度学习)等,形成车载边缘人工智能体系架构^[19],可解决多功能综合射频系统在高速移动过程中大吞吐量数据的分发、转换和处理等高速数据处理技术难点。

3 铁路新一代移动通信应用展望

3.1 “空天地一体化”网络

空间信息系统与陆地、空中信息系统共同构

建的空天地一体化信息系统,是未来信息时代的重要战略性基础设施。由空间卫星节点组成的天基网络和地面蜂窝网络进行异构融合,增加了网络广域覆盖范围,对于实现地面网络难以覆盖的边远地区通信与信息服务有其明显优势,已成为广域通信保障和信息应用的一个重要发展领域^[20]。国外以 OneWeb、Starlink 为代表的大规模低地球轨道(low earth orbit, LEO)小卫星互联星座正加速部署,我国也于2022年3月5日将银河航天02批6颗LEO宽带通信卫星成功送入预定轨道,与银河航天首发星共同组成LEO宽带通信试验星座,用于LEO卫星互联网、天地一体化网络等技术验证。

结合 CR450、超级磁悬浮、低真空管(隧)道高速列车等“新基建”创新工程发展需求,本文设计构建“空天车地一体化”网络架构,以高速行驶列车为核心,以“车-地、车-车、车-人”信息无缝协同交互为目标,实现未来铁路新一代移动通信网络与天基网络有机融合。“空天车地一体化”网络架构如图3所示。

针对图3的空间网络部分,由于外层空间相对空旷,LEO宽带通信卫星可以采用太赫兹通信或可见光通信的方式,凭借非常宽的频率范围和比较广的覆盖面积,卫星之间可以实现星间互联,

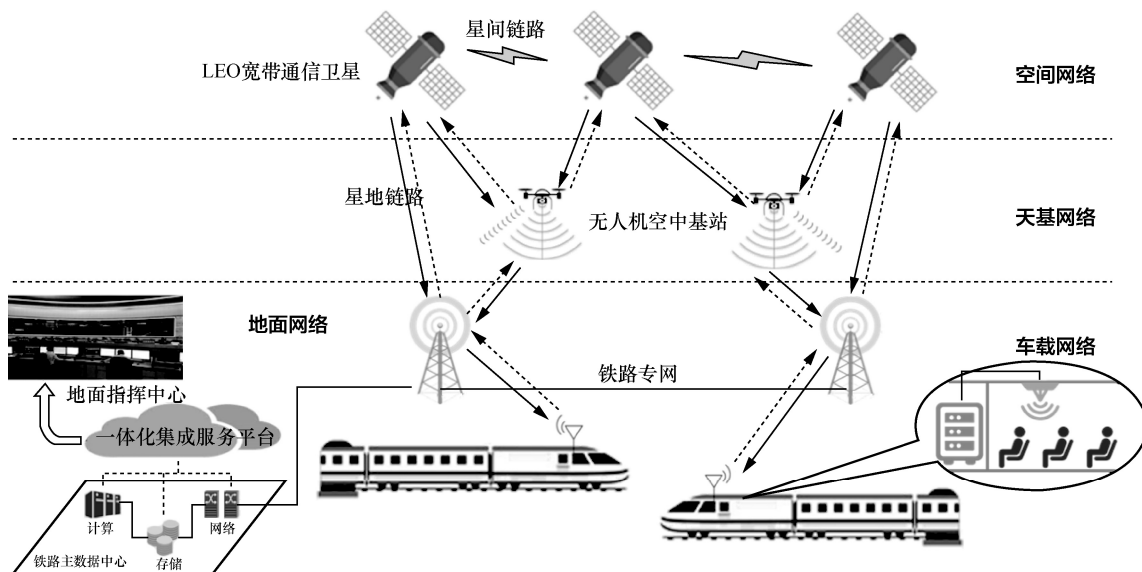


图3 “空天车地一体化”网络架构



构建空间“星座”网络^[21]。天基网络部分,依托高空气球、长航时无人机等平台搭载便携式基站形成空中接入点,也可以将其作为中继节点,构建高效便捷、机动灵活且不受复杂地形限制的空中接入网络^[22]。车载网络部分,本文给出两种接入方案。第一种方案,采用传统无线局域网络点对点(Ad Hoc)技术,搭建车载 Wi-Fi 网络,实现每列车厢内的无线覆盖;第二种方案,采用可见光通信技术,并结合“光—电”转换技术,实现每列车厢内的无线覆盖。两种组网方式最终都接入车载多功能综合射频系统,实现与地面网络的互联互通。

空间网络、天基网络、车载网络与地面网络之间通过星地链路构建全天候、全域覆盖、高速率的“空天车地一体化”网络^[23],一方面,通过 LEO 宽带通信卫星结合地面通信的星地协同网络,及时高效地传递列车控制、列车定位等车地传输的相关信息,实现对车辆和线路有效的智能管控;另一方面,“空天车地一体化”网络提升了网络覆盖的广度和深度,基于 5G 开展的智能铁路业务场景,如无人驾驶、智能列控、智能调度、虚拟建造等智能化业务将进一步增强,面向智能铁路全域通信、全场景数字孪生、全业务数智融合等目标将成为可能。

3.2 基于北斗的通信-导航一体化

北斗三号全球卫星导航系统的正式开通,标志着我国北斗卫星导航系统迈入全球服务新时代,成为继高铁之后又一张“国家名片”。北斗卫星导航系统重大专项——北斗铁路行业综合应用示范工程圆满完成,为我国建立铁路行业北斗“应用+标准”双重体系奠定了基础,有力促进了中国北斗和中国高铁两张“国家名片”的深度融合^[24]。《“十四五”铁路科技创新规划》指出,以北斗铁路行业综合应用示范工程为依托,大力推进北斗卫星导航系统、5G、人工智能、大数据、物联网、云计算、区块链等前沿技术与铁路技术

装备、工程建设、运输服务等领域的深度融合,构建我国自主可控的铁路北斗应用技术体系。《铁路 5G 技术应用科技攻关三年行动计划》也指出未来铁路要开展基于 5G 网络融合北斗、无源里程标等列车自主定位手段,实现列车追踪逻辑、位置共享和信息传输的“车-车通信”列车接近预警。

“北斗+5G”是实现天地一体、通导融合的重要时空基础设施,其具有天然通导一体化结合的趋势,相互赋能、彼此增强。在高精度定位方面,北斗卫星定位导航信号覆盖全球,室外直接定位精度可达米级,地基增强可达毫米级,但在室内、隧道和地下等遮挡区域,卫星定位信号接收困难,容易造成定位导航盲区。5G 网络采用下行时间差定位(downlink time difference of arrival, DL-TDOA)技术、上行时间差定位(uplink time difference of arrival, UL-TDOA)技术等多种定位技术,可在室内、地下空间等复杂条件下实现亚米级,甚至分米级定位精度。北斗与 5G 的深度融合能够形成室内外无缝的高精度定位能力^[25]。在精确授时方面,北斗卫星导航系统利用其精确授时功能,可为 5G 网络提供纳秒级网络时间同步以及高精度终端位置信息,辅助提高运行管理效率,提高网络的稳定性、可靠性。在信息传送方面,5G 网络具备高带宽、低时延特性,用户终端通过辅助北斗(assisted BeiDou navigation satellite system, A-BDS)定位技术,可以减少获取北斗卫星导航电文、概略位置、时间和频率等信息的时间,从而提高时空信息接收灵敏度^[26]。

北斗与 5G 融合的通导一体化将实现相互赋能,带来增量效应,依托其全空域、全时域、高精度、高可靠、高可用的时空信息感知能力,为高铁 350 km 自动驾驶、自然灾害监测等智能铁路应用提供技术支撑^[27]。

3.3 基于 MEC 的通信-计算-存储一体化

在铁路列车运行过程中,存在多种车-地数据交互的业务场景及应用^[28],主要包括:行车控制

类业务,如无线调度、车载高清视频监控控制系统、远程监测与故障诊断等;客运综合信息类业务,如客运信息发布、旅客服务、客运多媒体娱乐等;物联网检测监测类业务,如供电安全监测检测系统(6C)、移动票务、集装箱联运等;旅客移动宽带接入类业务,如移动办公、高清视频娱乐、即时通信、在线联机游戏、社交网络应用等。这些业务场景及应用会产生大量数据,现有的移动通信系统由于承载能力不足,终端到业务核心的时延较大,高速移动造成的频繁切换小区,导致信号质量不佳,极大地影响用户体验。

面对智能铁路应用高带宽、低时延等需求,借助 MEC 技术,将云侧功能和业务能力下沉到路侧基站,同时在车上部署车载 MEC 服务器,构建基于新一代移动通信网络+MEC 的“通信-计算-存储一体化”融合网络架构^[29]。一方面,利用列车低速运行或停靠站区的有限时间,通过新一代移动通信网络实现车-地数据的高速转发;另一方面,依托云边协同机制和策略,实现通信网络与计算、存储资源的高效融合与敏捷分配。基于 MEC 的“通信-

计算-存储一体化”融合架构如图 4 所示。

基于 MEC 的通信-计算-存储一体化本质上是连接与计算,其优势在于 MEC 靠近信息源,可以大大减少数据交互的时延问题,未来新一代移动通信系统将解决高带宽、大连接等问题,针对高铁移动过程中专网业务和公网业务共存场景,面向铁路各类用户差异化需求,可以实现应用、服务和内容的本地化、近距离、分布式部署。为了实现基于 MEC 的通信-计算-存储一体化在未来智能铁路中的应用,除了上述融合架构的研究应用,还应开展边缘缓存、边缘智能和内容分发网络(content delivery network, CDN)等研究^[30],在保障资源动态分配的基础上,把传输时延的影响降到最低。

4 结束语

未来是万物互联的社会,移动通信的作用也愈发重要。智能铁路是一个复杂庞大的系统性工程,聚焦智能感知、万物互联、高效传输等研究方向,需要突破解决系列移动通信的“卡脖子”

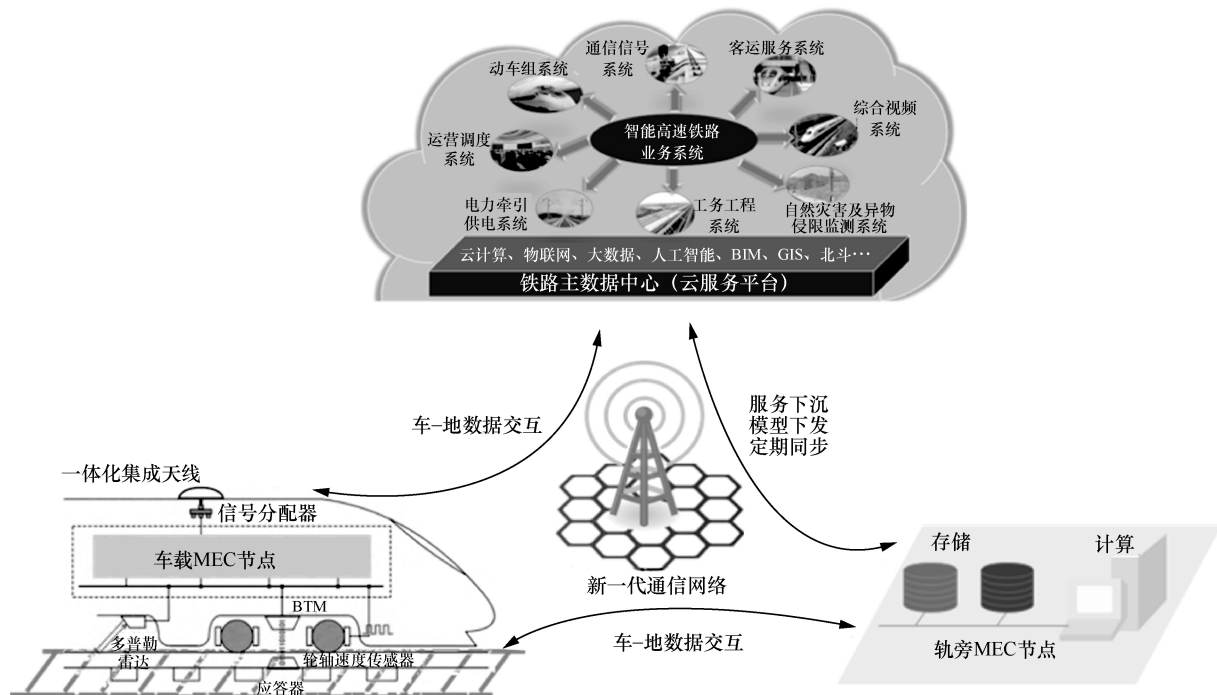


图 4 基于 MEC 的“通信-计算-存储一体化”融合架构



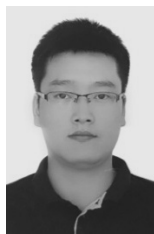
问题, 铁路通信技术变革已是大势所趋。本文基于我国铁路移动通信现状以及发展规划, 研究新一代移动通信关键技术, 目标是构建以高速行驶列车为核心、“车-地、车-车、车-人”信息无缝协同交互的“空天地一体化”网络, 并在智能铁路业务场景中开展通导一体化、通信-计算-存储一体化应用, 不断提升铁路移动通信服务能力和质量, 为我国智能铁路发展提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 熊杰. 我国铁路下一代移动通信系统制式及演进探讨[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(5): 879-885.
XIONG J. Standardisation and evolution of next generation railway mobile communication systems in China[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(5): 879-885.
- [2] 轨道世界. 铁科院联合 5G 设备厂商及三大运营商建设的“铁路 5G 创新实验室”正式投入使用[EB]. 2020.
Orbital World. The “Railway 5G Innovation Laboratory” built by China Academy of Railway Sciences in conjunction with 5G equipment manufacturers and three major operators was officially put into use[EB]. 2020.
- [3] 王同军. 铁路 5G 关键技术分析和发展路线[J]. 中国铁路, 2020(11): 1-9.
WANG T J. Key railway 5G technology analysis and development route[J]. China Railway, 2020(11): 1-9.
- [4] 孙昱. 铁路 5G 专用移动通信系统频率应用研究[J]. 铁道通信信号, 2021, 57(6): 27-32.
SUN Y. Study on available frequency for railway special 5G system[J]. Railway Signalling & Communication, 2021, 57(6): 27-32.
- [5] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(8): 963-987.
ZHAO Y J, YU G H, XU H Q. 6G mobile communication networks: vision, challenges, and key technologies[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2019, 49(8): 963-987.
- [6] 王玉文, 董志伟, 李瀚宇, 等. 典型大气窗口太赫兹波传输特性和信道分析[J]. 物理学报, 2016, 65(13): 134101.
WANG Y W, DONG Z W, LI H Y, et al. Atmospheric window characteristic and channel capacity of THz wave propagation[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(13): 134101.
- [7] 陈特, 刘璐, 胡薇薇. 可见光通信的研究[J]. 中兴通讯技术, 2013, 19(1): 49-52.
CHEN T, LIU L, HU W W. Visible light communication[J]. ZTE Technology Journal, 2013, 19(1): 49-52.
- [8] 马伟. 我国可见光通信取得突破[J]. 科技中国, 2015(11): 58.
MA W. China has made a breakthrough in visible light communication[J]. Science and Technology in China, 2015(11): 58.
- [9] 魏克军, 赵洋, 徐晓燕. 6G 愿景及潜在关键技术分析[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 17-21.
WEI K J, ZHAO Y, XU X Y. Analysis of 6G vision and potential key technology[J]. Mobile Communications, 2020, 44(6): 17-21.
- [10] 阳析, 金石. 大规模 MIMO 系统传输关键技术研究进展[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 28-35.
YANG X, JIN S. Overview of key technologies of transmission in massive MIMO system[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 28-35.
- [11] 朱林富, 李鹏, 王俊飞, 等. 高速铁路应答器传输系统复杂环境适应性研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(12): 62-69.
ZHU L F, LI K, WANG J F, et al. Study on adaptability of high-speed railway balise transmission system in complex environment[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(12): 62-69.
- [12] Polar 码成为 5G 新的控制信道编码[J]. 上海信息化, 2016(12): 87-88.
Polar code becomes a new 5G control channel code. Shanghai Informatization, 2016(12): 87-88.
- [13] 董兴芝, 阎志远, 王忠峰. 高速铁路动车组 Wi-Fi 与 5G 融合组网应用研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(6): 123-128.
DONG X Z, YAN Z Y, WANG Z F. Study on integrated network application of 5G and Wi-Fi on high speed railway EMU[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(6): 123-128.
- [14] 矫阳. 北斗+高铁: 两大重器加速融合[N]. 科技日报, 2022-03-18(03).
JIAO Y. BeiDou navigation satellite system+high-speed railway: the integration of the two heavy weapons is accelerated[N]. Science and Technology Daily, 2022-03-18(03).
- [15] 王中尧, 李卫东, 王连富, 等. 智能动车组 PHM 技术研究与应用[J]. 铁道车辆, 2021, 59(6): 101-104.
WANG Z Y, LI W D, WANG L F, et al. Research and application of PHM technology for intelligent EMU[J]. Rolling Stock, 2021, 59(6): 101-104.
- [16] 杨勇军, 梅进杰, 雷云龙. 综合射频系统技术研究进展及发展前景[J]. 舰船电子对抗, 2018, 41(5): 6-11.
YANG Y J, MEI J J, LEI Y L. Research progress and development prospect of integrated RF system technology[J]. Ship-board Electronic Countermeasure, 2018, 41(5): 6-11.
- [17] 刘志佳, 雷冀, 庄建楼, 等. 一种一体化集成宽带阵列天线设计[J]. 航天器工程, 2016, 25(6): 94-100.
LIU Z J, LEI J, ZHUANG J L, et al. Design of an integrated broadband microstrip array antenna[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(6): 94-100.
- [18] 杨心武. 基于微波光子技术的综合射频系统及其应用研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
YANG X W. Research on microwave photonic technology based integrated RF system and its application[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.

- jing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [19] 李毅, 董根才, 蔺伟, 等. 边缘计算技术在铁路 5G 移动通信中的应用研究[J]. 中国铁路, 2020(11): 23-30.
- LI Y, DONG G C, LIN W, et al. Research on application of edge computing technology in railway 5G mobile communication[J]. China Railway, 2020(11): 23-30.
- [20] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 1-16.
- WU W. Survey on the development of space-integrated-ground information network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 1-16.
- [21] 陈静. 虹云工程首星[J]. 卫星应用, 2019(3): 77.
- CHEN J. The first star of Hongyun Project[J]. Satellite Application, 2019(3): 77.
- [22] 贺子健, 艾元, 闫实, 等. 无人机通信网络的容量与覆盖性能[J]. 电信科学, 2017, 33(10): 65-70.
- HE Z J, AI Y, YAN S, et al. Performance evaluation of capacity and coverage in UAV communication networks[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(10): 65-70.
- [23] 陈姝元. 太空物联网: 星链计划的建构与哲思[J]. 数字通信世界, 2022(8): 158-160.
- CHEN S Y. Internet of Things in space—construction and philosophy of “Star Chain” program[J]. Digital Communication World, 2022(8): 158-160.
- [24] 赵旭, 丁静. 我国北斗在铁路行业的综合应用示范工程通过验收[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(4): 99.
- ZHAO X, DING J. China’s Beidou comprehensive application demonstration project in the railway industry has passed the acceptance[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(4): 99.
- [25] 刘海蛟, 刘硕, 刘文学, 等. 北斗+5G 融合定位技术研究[J]. 信息通信技术与政策, 2021, 47(9): 41-46.
- LIU H J, LIU S, LIU W X, et al. Research on positioning technology of Beidou satellite navigation system + 5G[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2021, 47(9): 41-46.
- [26] 邓中亮, 王翰华. “北斗+5G”融合发展机遇[J]. 卫星应用, 2021(11): 20-24.
- DENG Z L, WANG H H. “BDS +5G” integrated development opportunities[J]. Satellite Application, 2021(11): 20-24.
- [27] 人民铁道网. 京张高铁拥抱智能+时代[EB]. 2020.
- People’s Railway Network. Beijing Zhangjiakou high speed railway embraces the era of “intelligence+”[EB]. 2020.
- [28] 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.
- AI B, MA G Y, ZHONG Z D. 5G technologies and applications in high-speed railway[J]. ZTE Technology Journal, 2019, 25(6): 42-47, 54.
- [29] 张建敏, 谢伟良, 杨峰义, 等. 5GMEC 融合架构及部署策略[J]. 电信科学, 2018, 34(4): 109-117.
- ZHANG J M, XIE W L, YANG F Y, et al. 5G mobile/multi-access edge computing integrated architecture and deployment strategy[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(4): 109-117.
- [30] 郭嵩. 边缘计算与 CDN 协同技术[J]. 电信科学, 2019, 35(S2): 65-70.
- GUO S. Cooperative technology between edge computing and CDN[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(S2): 65-70.

[作者简介]



鲁玉龙 (1989—), 男, 北京经纬信息技术有限公司副研究员, 主要研究方向为铁路工程信息化、信息通信技术应用。



沈海燕 (1968—), 女, 中国铁道科学研究院集团有限公司电子计算技术研究所研究员, 主要研究方向为铁路信息化、信息通信技术应用。



张俊尧 (1992—), 女, 北京经纬信息技术有限公司助理研究员, 主要研究方向为铁路工程信息化。

杨兴磊 (1985—), 男, 北京经纬信息技术有限公司高级工程师, 主要研究方向为铁路工程信息化。

解亚龙 (1980—), 男, 中国铁道科学研究院集团有限公司电子计算技术研究所研究员, 主要研究方向为铁路工程信息化。

杨玲玲 (1983—), 女, 北京经纬信息技术有限公司副研究员, 主要研究方向为铁路工程信息化。