

· 专题:5G移动通信基础理论与关键技术 ·

面向智能高铁业务和应用的5G基础理论与关键技术

艾 渤¹ 章嘉懿^{2*} 何睿斯¹ 马国玉¹ 钟章队¹

1. 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

2. 北京交通大学 电子信息工程学院,北京 100044

[摘要] 本文基于国家杰出青年科学基金、优秀青年科学基金、牛顿高级学者基金、高铁联合基金等项目,针对面向智能高铁业务和应用的5G基础理论与关键技术研究进展情况展开综述,包括智能高铁场景的业务模型、网络架构、电波传播、信道模型、高可靠传输技术以及通信、计算与存储资源高效融合等国际前沿领域创新性研究成果。本研究组发表了一系列有影响力的学术论文,制定了国内外与智能高铁通信相关的多项标准,获得了多个国际学术奖励,培养了一批智能高铁通信专业人才,为我国引领国际智能高铁发展提供了有力支撑。本文最后提出了面向6G的智能高铁通信的部分研究方向。

[关键词] 5G/6G;智能高铁;信道模型;网络架构;可靠传输;融合计算

随着中国、德国、法国、西班牙、日本等国家高速铁路网的迅猛发展,世界范围内的铁路通信服务需求持续增长。根据国务院发布的《交通强国》建设纲要,未来高速铁路将向着客运服务网络化、运输组织智能化、安全监控自动化等方向发展,形成智能高铁。智能高铁是基于宽带接入、云计算、边缘计算、大数据、物联网、人工智能、建筑信息模型等新一代信息技术,综合高铁移动装备、固定基础设施及内外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,实现全生命周期一体化管理的智能化高速铁路系统^[1,2]。

1 研究背景

2019年12月30日,作为2022年北京冬奥会重点配套工程的京张高铁正式开通运营,标志着我国正式进入智能高铁时代。与传统高速铁路不同,智能高铁智慧化水平大幅提高,主要利用信息手段提升智能装备与运营、面向旅客的智能服务技术、智能建设等三个方面。由此可见,基于5G技术的智能高铁移动通信(5G-R,5G for railway)发展十分有必要。相比较于前几代移动通信技术,5G技术关注点



艾渤 北京交通大学二级教授、博士生导师,轨道交通控制与安全国家重点实验室常务副主任。国家杰出青年科学基金、首届优秀青年科学基金、国家自然科学基金委和英国皇家学会牛顿高级学者基金、国家中组部万人计划领军人才、科技部中青年科技创新领军人才、中国科协 and 香港求是基金会“求是杰出青年奖”、詹天佑铁道科技奖青年奖、北京市科技新星获得者;中国工程院“中国工程前沿杰出青年学者”;获得北京市优秀教师荣誉称号;国家6G总体组专家。主要研究领域为5G/6G及轨道交通专用移动通信系统。



章嘉懿 北京交通大学教授,德国洪堡学者,中国科协青年人才托举工程入选者。主要研究领域为多天传输理论和关键技术,主持国家自然科学基金面上项目等科研项目10余项,以第一/通信作者发表IEEE期刊论文26篇,授权国内外发明专利6项,研究成果获教育部自然科学二等奖1项、国际会议最佳论文奖2项。担任国际权威期刊IEEE JSAC、IEEE TCOM、IEEE CL、IEEE Access和IET COM编委,中国通信学会青年工作委员会委员。

主要集中在增强移动宽带、高可靠低时延以及大规模机器通信这三个场景。5G将赋予高速铁路更可靠的连接、更低的时延、更快的速率、更广的网络

收稿日期:2020-03-27;修回日期:2020-04-07

* 通信作者,Email:jiayizhang@bjtu.edu.cn

本文受国家自然科学基金项目(61725101,U1834210,6196113039,61971027)和牛顿高级学者基金(NA191006)资助。

覆盖以及更多的接入用户数,以满足智能高铁对于移动通信的需求。2019年,5G网络已在世界多个国家正式商用。预计到2020年末,我国将拥有超过一亿的5G用户。针对智能高铁的特殊业务和应用场景,具有颠覆性和适用性的5G关键技术包括:

(1) 大规模 MIMO 技术

大规模多天线(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术以提升系统的频谱效率为切入点,进而提升整个系统的传输速率。作为5G通信的关键核心技术之一,大规模MIMO技术在6GHz以下频点表现出卓越的性能。但大规模MIMO技术仍存在诸多实际应用挑战,譬如大规模MIMO带来的硬件复杂度和成本指数增加等。

(2) 毫米波技术

通过使用超宽的高频通信带宽(30~300GHz),毫米波技术可以提升通信系统的传输速率。但随之而来波束狭窄以及路径损耗大等问题限制毫米波技术在智能高铁场景下的应用。大规模MIMO技术结合波束管理是解决上述瓶颈问题的一个行之有效的方案。

(3) 高可靠低时延技术

高可靠低时延技术着力于满足智能高铁物联网(Internet of Things, IoT)以及控制系统通信中的高可靠与低时延需求。譬如针对智能高铁自动化场景,高可靠低时延技术需要满足毫秒级的时延控制以及 10^{-9} 的差错控制。当前高可靠低时延技术的主要技术挑战包括不同频带之间的同步、系统间协作以及流量优先等。

(4) 新型多址技术

利用非正交的时间、频率以及码字资源,新型多址技术可提升系统的接入用户容量。新型多址技术得以在5G网络中实际部署需要良好的功率控制以及干扰消除;另外在智能高铁IoT场景中采用随机接入模式也将进一步扩大系统的接入容量。上述问题均需进一步的研究。

北京交通大学智能高铁通信团队面向智能高铁中高容量、低时延、高可靠、高安全的业务与应用需求,针对高速铁路典型场景,开展一系列面向智能高铁业务和应用的5G基础理论与关键技术研究。

2 研究进展与成果

2.1 智能高铁场景业务模型

高速铁路是5G重要用例之一。5G要求支持

500 km/h的高速移动,满足每列车1000名旅客的高品质移动互联网接入,例如观看高清视频、在线游戏、远程访问、举行视频会议等,而且端到端时延要求与办公室条件下相当。然而目前的铁路通信系统不能很好地支持智能高铁的相关业务需求。为保障列车及旅客随时随地接入高品质网络,满足高铁用户的通信业务服务质量(Quality of Service, QoS)需求,根据铁路系统的实际应用,建立面向高速铁路场景的新型业务模型。

智能高铁移动通信系统包括铁路运营管理和旅客信息服务两方面业务。5G中定义的高速移动性用例是针对公网的旅客信息业务,而不涉及铁路专网的行业应用,然而高铁专用移动通信系统在承载业务方面与公众陆地移动通信网都有着显著区别:(1) 专网承载业务类型的特殊性,如列控业务、调度通信业务以及应用通信业务等;(2) 专网承载业务具有特殊的关键性能指标要求(KPI),如列控业务对传输可靠性的要求和时延要求,调度通信业务需要考虑集群通信的业务需求(多方通信、强拆等),应急通信条件下需要考虑脱网直通需求,具有通信高可靠性和设备独占性等特点;(3) 专网业务对安全性极端重视。此外,高速旅客业务需求也明显区别于公网用户,如密集性、群体性等。

结合国内轨道交通复杂的各类场景及机务、车务、工务、电务、车辆、客运等各专业部门的需求,研究并构建轨道交通宽带信息化通信业务列表,全面综合地捕获各业务的功能需求与数据特征,建立高铁信息化业务模型:

(1) 参照公网5G技术规范,国际铁路联盟提供铁路移动通信系统用户需求的初步报告,依据国内相关行业政策、规划等文件要求,调研国内铁路交通各专业部门及旅客的业务需求,制定高铁移动系统中列车运营与旅客娱乐业务清单,按照业务属性划分为列控及运行相关业务、列车综合服务业务、列车物联网业务和旅客车载移动宽带接入业务四大类,如表1所示;

(2) 与现有列车交通海量信息数据库平台建立联系,采集铁路交通系统通信设备的运营监控、网管监测、障碍处理、检修维护等状态信息,从地理环境、无线电环境、业务清单、终端密度、业务流量特征等多个维度调研并统计各应用场景的业务系统信息量;

(3) 通过文献研究法、定性分析法以及定量分析法,全面综合地捕获各业务的功能需求与数据特征,研究确定各业务模型关键参数(如带宽需求、时

表 1 智能高铁业务与应用分类

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

延要求、包长限制、业务流特征等),建立高铁通信的信息化业务模型。基于用户数量预测原则,参照 ITU-R M. 1768 建议书,进行频谱带宽需求分析,对智能高铁移动通信系统的频谱需求进行初步预测,作为无线电频率总体规划的参考。

2.2 智能高铁场景新型网络架构

为应对智能高铁移动通信业务需求和应用场景对网络提出的挑战,满足安全、便捷、高效、绿色、经济的现代化综合交通运输体系的发展趋势,5G-R 要通过基础设施平台和网络架构两个方面的技术创新和协同发展,从而实现网络变革。然而,丰富的 5G-R 应用场景对网络功能要求各异:从突发事件到周期事件的异构资源分配;从调度通信到运行状态监测的不同时延要求;从自动驾驶到车内社交网络的差异化移动性管理等。

面对复杂多样的业务场景,应遵循网络业务融合和按需服务提供的核心理念,引入去蜂窝的无线接入网拓扑,提供更灵活的无线控制、业务感知和协议栈定制能力;重构网络控制和转发机制,改变单一管道和固化的服务模式;为不同用户和业务应用提供高度定制化的网络服务,构建资源全共享、功能易编排、业务紧耦合的 5G-R 综合信息化使能平台。

如图 1 所示,5G-R 专网移动通信系统网络架构基于基础设施资源平台,由接入域、控制域和转发域

等三部分构成。车载接入单元及旅客接入单元经由接入域接入 5G-R 网络进行通信:(1) 资源平面包括通信、计算与存储资源的高效融合;(2) 接入域融合多种新型无线接入技术,后向兼容现有铁路专用基站,满足 5G-R 海量多类型的通信业务需求;(3) 控制域基于虚拟化网络功能,形成独立的转发控制及信令控制,支持网络切片技术按需构建专用/隔离的铁路业务虚拟网络,保障列车运营控制业务的严格时延需求,专注数据转发改善旅客业务的用户体验需求,推动 5G-R 网络深度开放扩展。

基于网络切片的高铁移动通信网络可以实现同一物理基础设施平台上同时运行多种网络切片,如图 2 所示。以高清视频监控、列车自动驾驶、铁路物联网为例,实现接入网(Radio Access Network, RAN)、转发层以及核心网(Core Network, CN)等全面切片划分,实现端到端的高铁通信网络切片部署。

综上所述,基于 5G 的高速铁路移动通信网络架构可以采用多种候选方案,但具体部署实施时还需考虑以下问题:(1) 高速铁路移动通信系统部署面临用户连接密度高、运行场景复杂多变等挑战;(2) 高速铁路交通网络部署范围较广,如何优化站址部署并保障用户服务质量;(3) 高速铁路交通场景中业务切片划分的原则,如何实现端到端网络切片设计及编排管理,以及虚拟资源动态分配等。

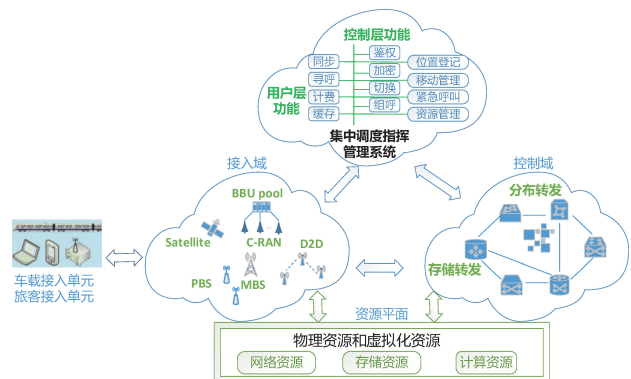


图 1 5G-R 专网移动通信系统网络架构-逻辑视图

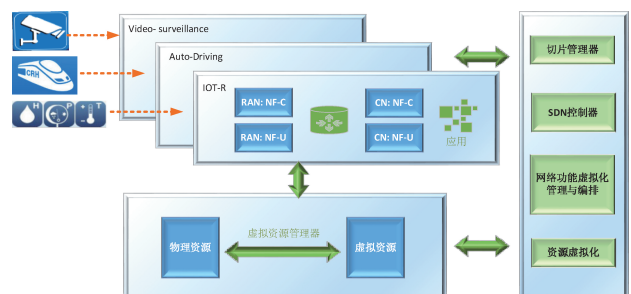


图 2 5G-R 专网移动通信系统网络架构-平台视图

2.3 智能高铁场景 5G 高频段电波传播特性和信道特征

2.3.1 智能高铁通信频率、场景及信道测量

高效可靠的专用通信系统有助于提升智能高铁的安全性和运行效率,并提供更加安全的铁路运行环境^[3]。无线通信系统设计和性能评估的重要基础之一是对相应场景下电波传播机制和无线信道特征的深入研究,而考虑到高速铁路有别于公网的场景特色和频段选择,需要对其开展有针对性的信道测量和建模技术研究。

(1) 智能高铁传播场景

无线电波传播场景划分在无线信道的研究中起着重要作用。考虑到智能高铁通信场景的特殊性,有必要对智能高铁的传播场景进行针对性划分。具体而言,根据研究现状及 5G-R 需求,将智能高铁传播场景分为高架桥、路堑、隧道、车站、城区、郊区、乡村、水域、山区、沙漠、车厢内和混合场景等 12 种类型^[4, 5]。

(2) 智能高铁通信频段

智能高铁是重要的战略基础设施,世界各国均为下一代铁路移动通信的发展分配了专属频谱资源^[6]。由于低频段的传输损耗较低等原因,当前用于铁路通信的频率主要集中于低频段。而另一方面,高频段可提供较大带宽,从而带来高数据速率。因此,采用毫米波和太赫兹波段是未来 5G 时代下智能高速铁路的一个重要演进方向。

(3) 智能高铁信道测量

5G 时代的智能高铁信道测量需要满足两项基本

需求:覆盖高速铁路典型场景、面向 5G 通信关键技术。具体而言,需要在支持例如大规模天线阵列和毫米波等 5G 关键技术的前提下,针对 5G 高速铁路典型应用场景开展信道测量^[7]。如图 3 所示,本团队已开展了大量相关工作,包括:在车站场景开展的 256 天线大规模 MIMO 信道测量^[8, 9];在高架铁路环境中开展的多基站切换场景下宽带信道测量^[10];在京津城际铁路开展的多种场景多天线信道测量^[11]。测试中获取的大量实测数据为信道参数的提取分析、信道建模和高速铁路通信系统仿真奠定基础。

2.3.2 智能高铁信道参数提取及分析

从高速铁路场景下获得的实测信道数据中可以估计提取出典型的信道特性参数,包括路径损耗、莱斯衰落 K 因子、多普勒频移和时延扩展等。这些参数对于铁路通信的收、发机设计具有显著影响。如图 4 所示,基于面向 5G 的高速铁路信道测量,提取并分析了多种高速铁路场景的典型信道特征参数^[9, 10]。通过对相应参数特性的分析与挖掘,可进一步开发智能高铁场景准确的信道预测模型。

在智能高铁场景中,由于无线信号在实际环境中遇到遮挡物所呈现的反射、散射及绕射等物理现象,在接收端能接收到来自不同传播路径的信号。这些信号在到达接收端时大多呈现簇结构^[12],如图 5 所示。多径簇是指信道中具有类似属性(例如到达角、离开角、时延等特性)的信号集合。基于多径簇结构进行的信道建模可以很好地取得模型复杂度和模型准确度的平衡^[13],因此,基于簇结构的信道参



图3 面向 5G 的高速铁路场景信道测量示意图

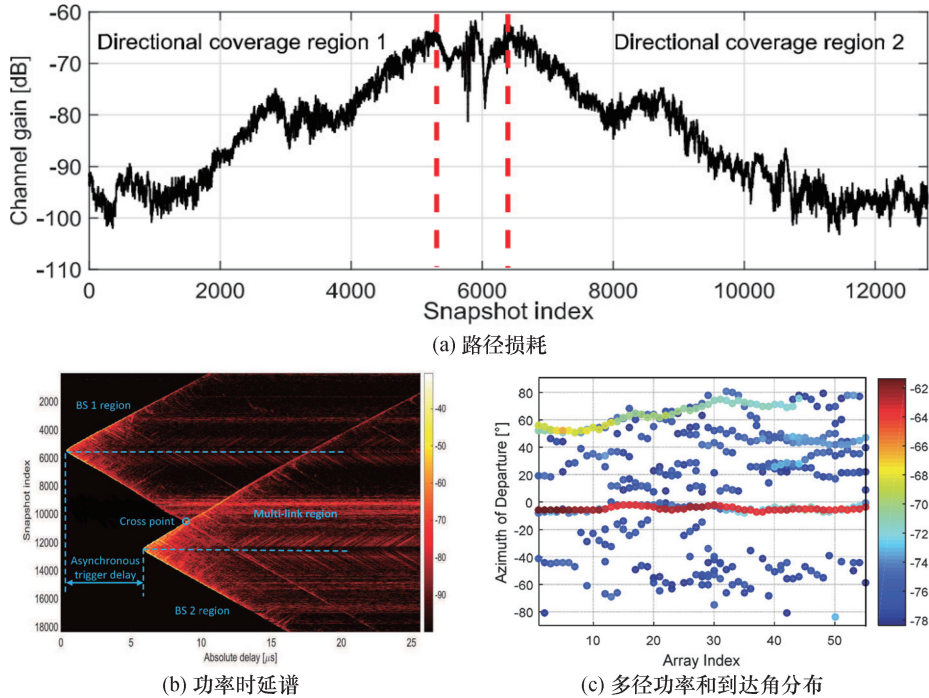


图 4 高速铁路场景典型信道特征参数示意图

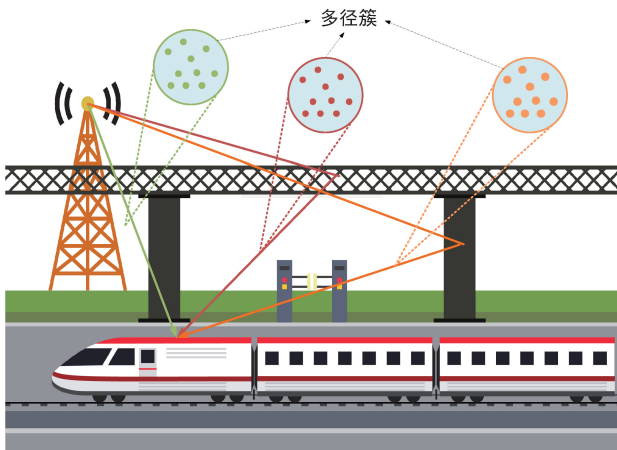


图 5 高速铁路无线信道多径成簇示意图

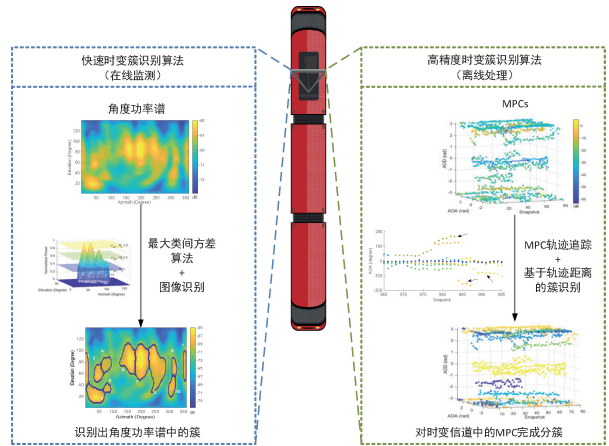


图 6 高速移动场景时变多径簇识别算法示意图

数提取和建模方法是 5G 智能高铁信道建模的关键。

由于智能高铁行驶速度较高,与环境中反散射体的相对速度较大,因此信道的时变特性较强,多径簇常呈现较为明显的演化、生灭等过程。针对以上两个特点,可采用实时部署的快速时变簇识别算法和用于处理离线数据的高精度时变簇识别算法。其原理如图 6 所示。

2.3.3 智能高铁电波传播特性及建模

考虑到智能高铁所在传播场景的特殊性,现有信道模型难以充分表征 5G 智能高铁通信的电波传播特性,因此有必要针对智能高速铁路场景下的 5G 通信展开针对性的电波传播特性和信道建模研究。

常规的信道建模方法可以概括为统计性建模、基于几何的随机性建模和确定性建模三类。基于前期所开展的大量 5G 智能高铁信道测量,本团队已针对智能高铁场景开展了一系列统计性及基于几何的随机性建模研究^[14-17]。而确定性建模方法可以在充分掌握环境电磁特征参数的情况下,实现对信道的预测。当前已开发了面向智能高铁场景的射线跟踪仿真器,以支持相应场景下确定性建模的研究^[18],为智能高铁场景中 5G 通信系统的设计提供了指导。

2.4 高速铁路行车安全相关业务的 5G 可靠高效传输技术

2.4.1 大规模 MIMO 技术

得益于大规模天线阵列的使用,集中式的大规

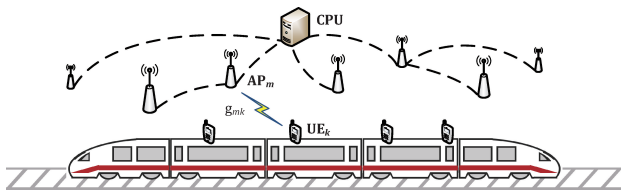


图7 面向智能高铁场景的去蜂窝大规模 MIMO 技术

模 MIMO 结合波束赋形技术,可以形成增益大、方向性佳的窄波束以追踪高速移动列车,同时大幅提升系统容量^[19]。在实际部署时,为了提高信号处理速率以及能量效率,一个可行的方案是采用分布式的大规模 MIMO 技术或者去蜂窝大规模 MIMO 技术^[20]。

如图7所示,不同于集中式的大规模 MIMO 技术,去蜂窝大规模 MIMO 技术在铁路沿线部署了大规模的分布式接入节点(Access Point, AP),这些 AP 之间通过集中处理单元(Central Processing Unit, CPU)协同工作,为高速列车提供数据通信服务^[21-23]。首先,大规模的 AP 为列车通信系统提供了均匀的高网络吞吐量以及全维度泛在覆盖;其次,由于去蜂窝网络架构不存在“小区”的概念,因而也就天然地解决了高速移动场景下最突出的“频繁切换”问题。研究表明,去蜂窝大规模 MIMO 技术可以有效对抗移动性带来的性能失真。然而,要在智能高铁场景中实际部署去蜂窝大规模 MIMO,还需解决系统容量和能耗之间的均衡,以及由于列车高速移动带来的系统相干时间大幅缩短等关键问题。

2.4.2 毫米波技术

毫米波频段有丰富的带宽资源,可提供 Gbit/s 的数据传输速率,因而可极大的提高 5G-R 系统容量。但毫米波通信也面临着高传播损耗的问题。考虑图8所示的智能高铁毫米波通信系统,利用高速列车的路线已知、位置可测等信息,可实现用于高铁移动场景的动态波束追踪^[24]和混合波束赋形^[25]。然而由于高铁场景复杂多变,潜在的遮挡场景可能带来短时的断链,造成巨大的安全和经济影响。因而针对遮挡而改进的混合波束赋形方案,可以保障

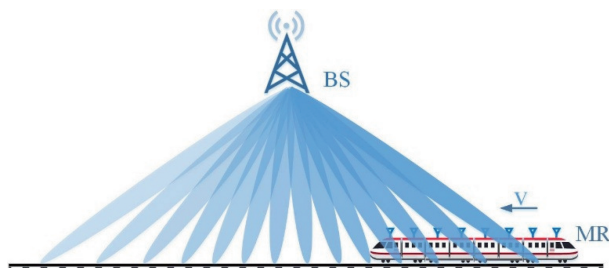


图8 智能高铁毫米波通信示意图

用户宽带需求并降低检测开销。通过有效功率控制,可以在保证数据传输速率的前提下,降低系统能耗^[26]。

2.4.3 高可靠低时延技术

高可靠低时延技术主要针对铁路通信的高速特性,主要的实现分为两个方面:(1)在“基于非理想信道状态信息的高可靠传输”方面,考虑有界信道估计误差的影响,通过提升基站的传输功率来降低传输时延,以保障最差情况下基站与高速列车之间传输的端到端可靠性;(2)在“基于混合自动重传请求的高可靠传输”方面,考虑到 5G 系统的频谱效率和能量效率,以及高可靠低时延技术的小数据包特性,采用基于有限码长编码理论下非正交多址接入方式的传输机制,在保障高速铁路通信时延可控的情况下实现能耗的最小化。上述结果和传输机制设计算法对目前 5G-R 高可靠低时延技术研究具有直接的理论帮助和工程价值。

2.4.4 新型多址接入技术

图9所示为智能高铁大规模物联网示意图。高铁大规模物联网所服务的地面设备往往具有低功耗要求,因而业界引入了免授权随机接入过程以降低设备的信令开销。同时由于大规模用户的接入需求和有限的频谱资源之间存在矛盾,传统正交多址无法满足大规模用户,进而需要考虑非正交多址接入方式。非正交多址技术能够提供更高的频谱利用率和较高的连接过载率,其系统可利用有限频谱资源服务大规模用户的免授权随机接入^[27, 28]。串联扩频多址技术作为一种新型的非正交多址技术可以在保证系统传输性能的前提下有效实现大规模用户接入^[29]。

2.5 通信、计算与存储资源的高效融合

面对智能高铁通信系统提出了超大带宽、海量连接、超低时延的需求,移动边缘计算可以将网络侧功能和应用部署能力下沉到近轨基站,实现通信、计算与存储资源的高效融合与弹性分配。针对高铁移动边缘网络中旅客用户和本地蜂窝用户共存场景,开展边缘缓存和内容传输研究^[30]。考虑各类用户

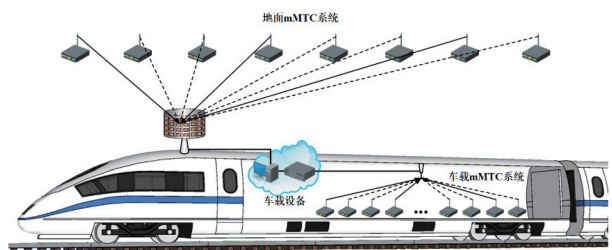


图9 智能高铁大规模物联网

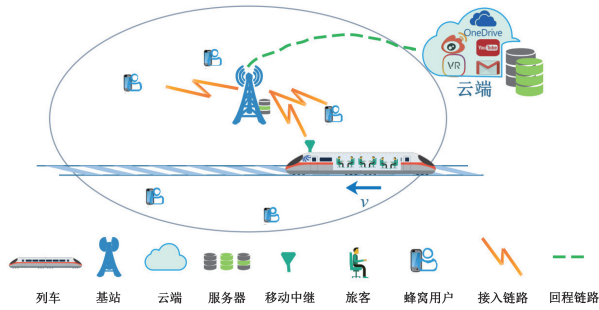


图 10 智能高铁移动边缘网络模型

的多样化业务需求以及信道差异,旨在设计高铁旅客用户最小化时延缓存传输方案,实现动态分配多维融合资源,并保障蜂窝用户的时延性能需求。鉴于多维资源紧密耦合,设计循环迭代求解算法逐步分配某一类资源,利用动态规划算法优化缓存分配,利用经典混合整数非线性优化算法-匈牙利算法优化通信资源分配,利用有限的多维融合资源,有效改善用户体验质量。

融合通信、计算与存储资源的 5G-R 网络在基础理论面临的主要挑战是网络容量分析与优化,包括通信、计算与存储资源的协同优化;在关键技术方面面临的挑战包括计算存储多播、节带化传输等。相关理论与技术研究成果促进云网协同,推动了智能高铁发展。

3 成果总结

北京交通大学智能高铁通信研究团队为我国高铁通信的发展以及 5G 在高铁场景的应用解决了重要实际问题,出版学术专著 19 部,发表国内、外权威学术刊物以及知名国际会议论文 200 余篇(10 余篇 ESI 高被引论文)、授权专利 20 余项。获得国家技术发明二等奖 1 项,中国电子学会科学技术奖技术发明一等奖 1 项、教育部自然科学二等奖 1 项,2018 CCF-腾讯犀牛鸟基金卓创奖 1 项。获得 IEEE VTS 2019 尼尔谢菲尔德最佳传播论文奖、IEEE ICC 等多项国际学术最佳论文奖。团队紧跟国家发展方针,与国际多方进行了紧密的交流与合作。团队创建了高铁场景低频段和毫米波频段信道模型库,成功应用于高铁网络规划与智能高铁通信系统,显著提升规划精度与通信速率。模型被 IEEE 标准组 802.15 TG3d(太赫兹通信)和 IG HRRC(毫米波高速移动通信)采纳,团队也因此成为全球首个太赫兹通信标准 IEEE 802.15.3d-2017 的主创单位(中国唯一)以及 ITU-R 首个面向 5G 的混合信道标准模型的主创单位。此外,团队在国际上首先提出了多

普勒压缩的概念,并开展了多普勒压缩技术原型系统的建设;与 IEEE Fellow、英国 Queen Mary University of London 的 Yang Hao 教授联合开展的轨道交通场景高频大规模 MIMO 信道测量与建模理论的研究也获得了国家自然科学基金委员会与英国皇家学会牛顿高级学者基金项目的支持。

团队研究“面向智能高速铁路的 5G 关键技术”入选 2018 年 56 项“世界互联网领先科技成果”;团队也成为欧洲铁路研究联盟唯一的非欧盟成员单位(中国唯一)以及欧洲科学技术合作计划和 3GPP 的成员单位。团队拥有 IEEE 通信学会亚太地区杰出青年学者获得者 1 名、英国皇家学会牛顿高级学者 1 名、德国洪堡基金会研究基金获得者 2 名,担任多个 IEEE 顶级期刊编委。由团队自主研发的高性能射线跟踪平台,基于云计算、射线跟踪和三维场景重构技术,实现了对各类真实场景电波传播特性的仿真和建模,支持高铁场景的网规网优以及各类通信系统的设计、研发与评估。

4 结论与展望

通信技术将随着人们对于智能高铁业务和应用需求的不断提高而持续地发展。在过去的 20 年里,高铁移动通信技术从 GSM-R 发展到了如今的 5G-R,而我国在高铁移动通信基础理论研究以及技术开发中所处的地位也从曾经的“落后”变为“紧跟”,再到现如今的“领跑”。我们不但要一方面以领跑的姿态全面进行 5G-R 网络的建设,更要为第六代移动通信技术(6G)做好理论和技术储备。

6G 将更加以用户的需求为主导,呈现出更加具体且多元的形态。具体来说,6G 的业务和应用发展将呈现业务需求多样化,覆盖立体化,交互形式与内容多样化,业务开放化和定制化,通信、计算、人工智能和安全融合化的趋势。而为了满足这样需求,6G 的网络和通信将呈现应用范围扩张(空天地海一体化网络)、资源利用扩张(全频段、全波段、全覆盖)、智能通信(自感知、自学习、自优化、自演化)的发展趋势。

而智能高速铁路作为 6G 的重要应用场景之一,必将在当前业务和应用基础上衍生出更多的用户需求。借由 6G 支持,未来智能高铁可实现全自动驾驶、基于空天地海一体化的轨道交通安全运行监测、超高清晰度(4K/8K)列车监控,列车的高精度(cm 级)定位等。为了满足这些业务和应用需求,可能采用的解决方案包括:(1) 基于高频毫米波的去蜂窝智能网络架构;(2) 超高可靠超低时延技术;

(3) 基于空天地一体化的列车运行安全全方位立体监测;(4) 基于人工智能的智能高铁物联网技术;(5) 基于数字孪生体域网的列车驾驶员行为监控、预测和决策。

北京交通大学智能高铁通信研究团队紧密围绕关键科学问题,参与高水平国际合作,发挥团队学科交叉特点,取得了国际公认的5G-R创新性研究成果,未来将进一步致力于B5G/6G技术在智能/智慧高铁发展中的应用,为我国在国际上领跑智能/智慧高速铁路建设贡献力量。

参 考 文 献

- [1] 艾渤, 马国玉, 钟章队. 智能高铁中的5G技术及应用. 中兴通讯技术, 2019, 25(6): 42—54.
- [2] 钟章队, 艾渤, 陆平, 等. 综合轨道交通5G应用技术白皮书. 北京, 2019: 1—95.
- [3] Ai B, Guan K, Rupp M. Future railway services-oriented mobile communications network. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(10): 78—85.
- [4] Ai B, Cheng X, Kuerner T, et al. Challenges toward wireless communications for high-speed railway. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(5): 2143—2158.
- [5] Ai B, He RS, Zhong ZD, et al. Radio wave propagation scene partitioning for high-speed rails. International Journal of Antennas and Propagation, 2012.
- [6] He RS, Ai B, Wang GP, et al. High-speed railway communications: from GSM-R to LTE-R. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, 11(3): 49—58.
- [7] He RS, Ai B, Wang GP, et al. Propagation channels of 5G millimeter wave vehicle-to-vehicle communications: recent advances and future challenges. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020, 15(1): 16—26.
- [8] Ai B, Guan K, He RS, et al. On indoor millimeter wave massive MIMO channels: measurement and simulation. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(7): 1678—1690.
- [9] Li JZ, Ai B, He RS, et al. A cluster-based channel model for massive MIMO communications in indoor hotspot scenarios. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(8): 3856—3870.
- [10] Zhang B, Zhong ZD, He RS, et al. Measurement-based markov modeling for multi-link channels in railway communication systems. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(3): 985—999.
- [11] Fei D, Ding J, Huang B, et al. Measurements-based research on correlation of MIMO channel in high-speed scenario. 2018 16th International Conference on Intelligent Transportation Systems Telecommunications (ITST), Lisboa, 2018: 1—5.
- [12] He RS, Ai B, Molisch AF, et al. Clustering enabled wireless channel modeling using big data algorithms. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(5): 177—183.
- [13] He RS, Li QY, Ai B, et al. A kernel-power-density based algorithm for channel multipath components clustering. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(11): 7138—7151.
- [14] He RS, Zhong ZD, Ai B, et al. An empirical path loss model and fading analysis for high-speed railway viaduct scenarios. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011, 10: 808—812.
- [15] He RS, Ai B, Zhong ZD, et al. A measurement-based stochastic model for high-speed railway channels. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(3): 1120—1135.
- [16] Chen BH, Zhong ZD, Ai B, et al. A geometry-based stochastic channel model for high-speed railway cutting scenarios. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 851—854.
- [17] Zhang B, Zhong ZD, He RS, et al. Measurement-based multiple-scattering model of small-scale fading in high-speed railway cutting scenarios. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1427—1430.
- [18] He DP, Ai B, Guan K, et al. Channel measurement, simulation, and analysis for high-speed railway communications in 5G millimeter-wave band. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(10): 3144—3158.
- [19] Zhang JY, Björnson E, Matthaiou M, et al. Prospective multiple antenna technologies for beyond 5G. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, accepted 2020.
- [20] Zhang JY, Chen SF, Lin Y, et al. Cell-free massive MIMO: a new next-generation paradigm. IEEE Access, 2019, 7: 99878—99888.
- [21] Liu H, Zhang JY, Zhang XD, et al. Tabu-search based pilot assignment for cell-free massive MIMO systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(2): 2286—2290.
- [22] Jin Y, Zhang JY, Ai B, et al. Channel estimation for mm Wave massive MIMO with convolutional blind denoising network. IEEE Communications Letters, 2020, 24(1): 95—98.
- [23] Jin Y, Zhang JY, Jin S, et al. Channel estimation for cell-free mmWave massive MIMO through deep learning. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(10): 10325—10329.
- [24] Gao ML, Ai B, Niu Y, et al. Dynamic mmWave beam tracking for high speed railway communications. 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), Barcelona, 2018: 278—283.

- [25] Gao ML, Ai B, Niu Y, et al. On hybrid beamforming of mmWave MU-MIMO system for high-speed railways. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Shanghai, China, 2019: 1–6.
- [26] Wang L, Ai B, Niu Y, et al. Energy-efficient power control of train-ground mmWave communication for high-speed trains. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(8): 7704–7714.
- [27] Ma GY, Ai B, Wang FG, et al. Joint design of coded tandem spreading multiple access and coded slotted ALOHA for massive machine-type communications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(9):4076–4083.
- [28] Ma GY, Ai B, Wang FG, et al. Tandem spreading network-coded division multiple access. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(1): 390–398.
- [29] Ma GY, Ai B, Wang FG, et al. Coded tandem spreading multiple access for massive machine-type communications. *IEEE Wireless Communications*, 2018, 25(2): 75–81.
- [30] Gao ML, Ai B, Niu Y, et al. Edge caching and content delivery with minimized delay for both high-speed train and local users. *IEEE Global Communications Conference (Globecom)*, Waikoloa, Hi, USA, 2019: 1–6.

Fundamental Theory and Key Technologies of 5G for Service and Application of Intelligent High-Speed Railway

Ai Bo¹ Zhang Jiayi^{2*} He Ruisi¹ Ma Guoyu¹ Zhong Zhangdui¹

1. *State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044*

2. *School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044*

Abstract Based on National Science Fund for Distinguished Young Scholars, Excellent Young Scientists Fund, Royal Society Newton Advanced Fellowship, and NSFC-CRC joint fund, the research on service and application of intelligent high-speed railway (HSR) oriented fundamental theory and key technologies of 5G is summarized in this paper. The contents include innovative research in international frontiers, such as service model, network architecture, radio propagation, channel model, high reliable transmission techniques and joint communication, caching, and computing design. The research group published a series of high-quality academic papers, formulated a number of standards related to intelligent HSR communications, obtained a number of international academic awards, trained a group of professionals, provided a strong support for the Chinese leadership in the development of international intelligent HSR communications. Finally, this paper put forward some research directions for intelligent HSR communications for 6G.

Keywords 5G/6G; intelligent high-speed railway; channel model; network architecture; reliable transmission; fusion computing

(责任编辑 姜钧译 吴妹)

* Corresponding Author, Email: jiyizhang@bjtu.edu.cn