

面向智能高铁的低轨卫星通信发展综述

苏昭阳¹, 刘留¹, 张嘉驰¹, 周涛¹, 蔺伟², 梁轶群²

(1. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044;
2. 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所, 北京 100081)

摘 要: 低轨卫星具备大带宽、低时延、广覆盖等优点, 非常适合作为地面网络的补充, 实现智能高铁全线路覆盖、无缝连接的要求, 有助于构建空地一体化通信网络。针对现行铁路移动通信网络存在的不足, 研究低轨卫星在智能高铁中的应用以及关键技术, 首先分析智能高铁的通信需求, 然后介绍国内外铁路卫星通信的发展现状, 最后从传播特性、物理层参数、波束切换、资源管理等几个方面对低轨卫星应用在智能高铁领域的关键技术与挑战进行探讨。

关键词: 智能高铁; 低轨卫星通信; 5G-R

中图分类号: U285

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023034

Review of the Development of Low Earth Orbit Satellite Communication for Smart High-Speed Railway

SU Zhaoyang¹, LIU Liu¹, ZHANG Jiachi¹, ZHOU Tao¹, LIN Wei², LIANG Yiqun²

1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China
2. Signal & Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China

Abstract: Low-earth orbit satellites have the advantages of wide bandwidth, low latency, and large coverage, making them very suitable as a supplement to ground cellular networks. Low-earth orbit satellites can meet the requirements of smart high-speed railway full line coverage and seamless connection, which helps to build an integrated communication network between ground and space. Considered the shortcomings of the current railway mobile communication network, the application and key technologies of low earth orbit satellites in smart high-speed railway were studied. Firstly, the communication requirements of smart high-speed railway were analyzed, and then the development status of railway satellite communication at home and abroad were introduced. Finally, the key technologies and challenges of low earth orbit satellite application in the field of smart high-speed rail were discussed from the aspects of propagation characteristics, physical layer parameters, beam handover, and resource management.

Keywords: smart high-speed railway, low earth orbit satellite communication, 5G-R

0 引言

截至2022年9月底, 我国铁路营业里程已达15.3万千米, 99%的20万人口以上城市已被铁路网覆盖, 高铁运营总里程已经超过4万千米。根据中国国家铁路集团有限公司(以下简称“国铁集团”)2020年8月出台的《新时代交通强国铁路先行规划纲要》, 到2035年, 我国将

率先建成现代化铁路网, 全国铁路运营里程20万千米左右, 其中高铁7万千米左右。2022年, 国铁集团提出“中国智能高速铁路2.0”, 提出以现代信息网络为主要载体, 5G、数字孪生、自动驾驶、MaaS+智能服务等新一代信息通信技术融合应用, 全面加速推进铁路行业的数字化、智能化建设^[1]。

铁路专用移动通信是铁路信息化、数字化、智能化的

收稿日期: 2023-01-07; 修回日期: 2023-05-07

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划(No.N2023G060); 国家自然科学基金资助项目(No.62341102)

Foundation Items: Technology Research and Development Program of China Railway (No.N2023G060), The National Natural Science Foundation of China (No.62341102)

重要基础设施和关键技术装备，在支撑铁路运营、保障行车安全、提高运输效率、提升维护水平等方面发挥着重要作用^[2]。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^[3]。未来，智能高铁的发展对无缝高数据速率通信、覆盖范围等提出更高要求，高铁移动通信系统将建立可信的通信网络，以实现高移动速度下高数据速率的持续在线及可靠传输^[4]。目前，我国铁路广泛使用的专用 GSM-R 网络，已覆盖我国全部高速铁路、客运专线和其他客货混运线路等大部分铁路沿线，形成了一整套完整且必要的铁路专用移动通信系统。然而，GSM-R 网络属于第二代移动通信系统，带宽小、速率低，网络所能承载的业务和提供的能力都非常有限，目前通信设备制造商已逐渐减少相关设备生产，转而提供技术服务和现存配件。在“中国智能高速铁路 2.0”体系架构中，在关键技术创新方面，围绕智能建造、智能装备、智能运营 3 个方面展开，迫切需要加快新一代信息技术等与铁路的深度融合，通过新一代移动通信技术赋能智能高铁，提供大带宽、大连接、低时延、高可靠的传输通道，解决增强型移动宽带（enhanced Mobile Broadband, eMBB）、海量机器类通信（massive Machine Type Communication, mMTC）和低时延高可靠通信（ultra Reliable Low Latency Communication, uRLLC）需求。

铁路低轨卫星通信因其在覆盖范围、灵活组网、通信距离等方面的独特优势，有望成为未来智能高铁移动通信系统的重要组成部分。

1 铁路通信需求分析

1.1 铁路 5G 通信

自 20 世纪 60 年代以来，我国铁路移动通信系统经历了从无线列调到 GSM-R 等技术的发展。随着智能高铁的提出，铁路通信系统需要满足大带宽、高速率的业务传输，然而 GSM-R 通信系统所能承载的业务和提供的能力都非常有限，且相关设备也即将停产。5G 作为新一代移动通信技术，具备大带宽、大连接、低时延、高可靠等特点，是支撑经济社会数字化、网络化、智能化转型的关键新型基础设施。将 5G 技术与铁路各系统进行融合已经成为下一代铁路移动通信系统的主要研究方向，有利于推动我国实现智能化铁路，提高铁路的安全水平与运行效率，巩固我国铁路世界领先优势。

针对各业务的承载需求，可以将所有业务分为 5G 专网单独承载、5G 公网单独承载、5G 专网和公网共同承载 3 种类型。对于铁路 5G 专网，其本身频率范围有限，5G-R

相比于 GSM-R 可以提供更大的带宽，且组网可控性强，能够保障全段覆盖与及时修复；对于铁路 5G 公网，其可为铁路车地数据传输、视频传输等业务提供大带宽支持，为大量监控设备与检测传感设备提供大连接服务，低时延传输保证了各业务的精准传输。

5G 专网单独承载业务均为与行车直接相关的行车控制类业务，这些业务直接影响了列车行车安全，对数据实时性要求最高，要求移动通信网络必须具备高可靠且完全可控的特点。5G 专网和公网共同承载的业务主要为运行维护类业务，这些业务对数据实时性要求较低，可根据数据对实时性、安全性的要求和网络环境灵活选择移动通信网络。5G 公网单独承载业务主要为非实时性业务，具有业务量较多，数据量较大的特点。各类业务的承载方式以及业务需求见表 1。

表 1 5G 铁路通信业务承载方式及业务需求

承载方式	典型业务	业务需求
5G 专网单独承载	行车控制类业务	高实时性 高可靠性
5G 专网和公网共同承载	运行维护类业务	低实时性 灵活承载
5G 公网单独承载	运营管理类业务	非实时性 数据量大
	旅客服务类业务	
	工程施工类业务	

以 5G-R 为依托的智能高铁移动通信系统在面临部分极端环境时，可能会因为基站被破坏或者难以部署基站而导致覆盖困难。以川藏铁路为例，若仅依靠传统的陆地蜂窝覆盖方式，在洪水、地震、泥石流等恶劣自然灾害情况下传统通信方式将无法满足应急救援用网需求。此外，铁路作为我国“一带一路”走出去战略的重要支撑，在境外铁路沿线无专网覆盖的条件下，列车的行车控制类和运行维护类数据的安全有效回传，也需要高效信息通信技术的支撑。

1.2 铁路物联网

作为新一代应用基础设施，物联网对未来智能高铁的发展具有重要意义。当前，通过标识识别、状态传感、定位导航与控制反馈等技术，物联网在车号识别、电子客票、行车安全监控、运行环境监控等方面已经有了广泛应用^[5]。然而，目前的铁路物联网存在末端组网不灵活、前端处理平台不完善、系统多且独立的缺点，无法满足未来铁路智能运维的需要。

“中国智能高速铁路 2.0”将基于“模数驱动，轴面协同”理念实现全专业协同和跨行业综合，在“中国智能高

速铁路 2.0”数据体系架构中,物联网作为数据汇集层的重要组成部分,负责监测智能建造、智能装备和智能运营三大板块的数据,实现对基础设施、行车环境、移动设备等的泛在感知与宽带数据传输^[1]。各终端设备与铁路通信系统全面连接,构建统一的物联网管理平台,对回传的数据进行分析处理,实现各物联网系统的深度融合,保障高铁运维的实时监控与远程维护需求。

铁路物联网从结构上自下而上可以分为感知层、承载层与应用层,其中承载层关系着数据能否安全可靠地传递至分析中心。目前典型的承载技术有 GPRS、NB-IoT、LTE、WLAN 等^[6],然而,GPRS 与 NB-IoT 均只支持窄带宽、非实时的数据发送;LTE 与 WLAN 虽然支持高带宽与实时数据传输,但是 WLAN 覆盖范围有限,且均依赖于基站或者无线接入点的部署,无法有效应对自然灾害与特殊地形。

除了传统的接入方式外,铁路卫星通信与铁路物联网的结合也逐渐受到关注。宽带卫星具备广覆盖和大容量的接入能力,组网成本低,适合区间特殊地段高带宽的数据传递。但是由于星地链路传输时延较大,因此其对高实时数据传输的能力弱于地面承载网络。

综上所述,现有承载技术均难以独自满足“中国智能高速铁路 2.0”铁路物联网的多样化需求,需要根据业务需求综合运用多种技术。将卫星通信与地面承载网络相结合,能够有效扩大覆盖范围,应对不同运行区段的传输需求,有助于实现列车运行全过程的数据监测、回传与分析,提高行车安全性与运营效率。

1.3 铁路通信发展趋势

未来铁路通信业务扩展方向是宽带化、自动化、可视化、多样化,为满足未来铁路数字化的要求,需要一套具备大带宽、低时延、高可靠能力的解决方案。铁路系统可以采用北斗卫星定位替代传统轨道电路及轨旁设备,并实现列车与列车之间的直接通信,保障行车安全,提高线路运输能力。此外,天基、空基和地基的接入,在不同环境和业务场景下各有优势,空天地一体化网络可以综合利用固网资源和卫星资源,并发挥其优势来扩展移动网络的覆盖范围,同时通过天基、空基和地基的多接入融合,提供更高的速率、更好的服务质量和更高的可靠性。我国在非洲援建或修建的铁路,往往穿过原始森林、无人区等偏远地区(如亚吉铁路、坦赞铁路等),甚至有些地区的通信信号系统容易遭到人为的破坏。基于上述问题,可以充分利用空天地一体化的通信系统完成列车运行的指挥控制,保证列车安全运行。

2 国内外铁路卫星通信发展现状

2.1 国外铁路卫星通信的发展

20 世纪 80 年代开始,日本国营铁路与邮政省协作,使用中通量通信卫星“樱花号”,进行了电波传播、链路质量等研究,开展了传真、图片和通话等方面的测试,并将卫星通信作为地震等自然灾害出现时应急通信的手段。20 世纪 90 年代,日本货物铁道公司在易发生地震的东海道本线和山阳本线列车上安装 GPS 定位装置,通过卫星把定位信息传送给货运调度,以让货运调度实时掌握列车位置信息^[7]。

2005 年,由于欧洲航天局(European Space Agency, ESA)的支持,在布鲁塞尔和巴黎之间运行的 Thalys 列车上的乘客可以通过卫星访问宽带互联网。该技术通过车顶天线实时跟踪 36 000 km 高度的卫星实现车地通信,并支持 300 km/h 的移动速度。在 2005 年的试验中,下行链路带宽约为 2 Mbit/s,上行链路带宽约为 0.5 Mbit/s。

2007 年,法国的高速铁路系统在 TGV 高速列车上开通了互联网业务,该技术利用卫星通信技术,在车辆内覆盖 Wi-Fi 信号,解决乘客上网和收发邮件等通信需求,并支持最多 20 位乘客同时在线使用。该项技术在列车顶部使用特殊天线实时对准追踪卫星,并支持 320 km/h 的移动速度。

2010 年,哈萨克斯坦的阿斯塔纳-阿拉木图-阿斯塔纳路线上,ASTEL 为高速列车 Tulpär (速度 130 ~ 140 km/h)提供卫星互联网接入。该项目的主要目的是通过卫星天线安排与列车的通信信道,从而保持高速卫星的参考点运动。火车内的信号是通过 Wi-Fi 分发的,通过覆盖哈萨克斯坦全境的卫星通信系统宽带频道为乘客提供互联网服务。最大传输速率达 2 Mbit/s。该设备允许数据在静止位置和速度高达 350 km/h 的运动中进行语音和视频传输。

2.2 国内铁路卫星通信的发展

20 世纪 80 年代,我国开始探讨卫星通信在铁路中的应用,组织北京交通大学、铁道科学研究院于 1988 年 5 月共同完成了《卫星通信在铁路上发展的研究》,为发展铁路卫星通信提供了决策依据。1992 年,原铁道部、交通部和国际海事卫星组织开展合作,基于全球定位系统(Global Positioning System, GPS)接收机和海事卫星构建了列车位置报告系统,利用海事卫星建成列车卫星移动电话通信系统,并进行了列车卫星移动通信和卫星列车定位的试验。《卫星通信在铁路上发展的研究》对卫星通信在

铁路中的应用做出了以下贡献:

(1) 分析卫星通信在铁路中应用的必要性和可行性,提出铁路开展卫星通信的技术政策建议与应当具备的功能;

(2) 提出采用两级通信网即局级全联通网和分局级星状网的组网方案,率先建立北京、兰州、乌鲁木齐、柳州4个小数据站的独立数据通信网方案,以及在北京、沈阳、上海等12个路局间构成全联通网的方案;

(3) 对光缆、数字微波、卫星3种通信手段做了经济比较和综合评估,结果表明卫星通信的综合评估结果最佳;

(4) 对卫星通信制式进行比较,建议采用适当的多址方式,并创造条件发展TDMA制式;

(5) 提出卫星通信地球站设备技术条件,并提出铁路卫星通信网的实施意见。

近年来,为满足列车运行控制对于列车定位精确性、安全性和可靠性的要求,除了传统的里程计、查询应答器,包括美国GPS、中国北斗卫星导航系统在内的全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)也开始用于列车实时定位。GNSS可为列控系统提供列车位置和速度,其测量误差直接影响到列车安全防护距离、追踪间隔、闭塞控制方式等,误差过大将直接触发列车制动,影响运输效率和乘客舒适度,甚至影响列车安全^[8]。此外,北斗短报文功能,也用于列车运行控制信息的传输^[9]。将卫星导航系统引入列车定位领域,能够使列车定位尽量减少对地面设备的依赖,实现低成本与高自主性优势,符合现代铁路安全/非安全应用服务的发展需要^[10]。

2.3 低轨卫星发展情况

随着6G的研究不断深入,发展空天地一体化网络已成为共识。空天地一体化网络架构是6G的核心方向之一,被ITU列为七大关键网络需求之一。低轨(Low Earth Orbit, LEO)卫星以其星座和信号的独特优势,逐步受到世界卫星导航领域的关注和青睐,有望成为新一代卫星导航系统发展的新增量。相比中高轨卫星,低轨卫星具备成本低、通信时延低、速率高、容量大等特性。因此,LEO卫星互联网作为地面蜂窝网络的补充有着巨大优势。

LEO卫星网络可以以较低的发射成本和低时延等高使用价值投入商业应用,通过星座组网实现全球无缝覆盖。美国的铱星系统,是全球唯一的采用星间链路组网、全球无缝覆盖的低轨星座系统。二代铱星可提供10 Mbit/s以上的传输速率,同时还具备对地成像、航空监视、导航

增强、气象监视等功能^[11]。Globalstar系统是由美国劳拉公司和高通公司倡导发起的卫星移动通信系统,星座系统由48颗卫星及16个地面站组成,星上采用透明转发,没有星间链路,轨道高度1414 km,共8个轨道面^[12]。目前,iPhone14系列支持紧急SOS卫星通信功能,支持从偏远地区发送紧急信息,其使用的卫星通信功能就是由Globalstar系统提供的。

2015年,英国OneWeb公司提出的“OneWeb”星座计划,可实现全球实时的宽带互联。目前,OneWeb卫星测试网速达到400 Mbit/s,平均时延32 ms^[13]。同年,Space X公司提出的星链(Starlink)计划,通过大规模LEO卫星为全球提供高带宽、低时延的宽带服务^[14]。目前,Starlink已发射超过3000颗LEO卫星,平均下载网速可达到120 Mbit/s,平均时延为30 ms,已完成了北美和欧洲的卫星互联网覆盖。

2015年,我国开始建设低轨卫星通信项目^[15]。近年来,商业航天公司银河航天发射了多颗低轨宽带通信卫星,构建了首个星地融合的5G试验网络,并开展了车载“动中通”测试。2021年,中国卫星网络集团有限公司成立,标志着我国将全面建设以LEO卫星通信系统为代表的太空基础设施,加速卫星互联网建设。2022年,依托北京邮电大学的“北邮-银河号”低轨卫星成功发射,执行在轨的通信-遥感融合试验任务^[16]。

随着LEO卫星规模组网、信息融合等技术的发展,LEO卫星下一步将与卫星车载通信、通信-导航-遥感一体化、空天地一体化等领域进行深度融合,具备广阔的发展前景。LEO卫星以其广覆盖、全天候、大带宽和低时延的特点成为弥补地面网络覆盖盲区最有效的解决方案,因而将低轨卫星互联网应用到智能高铁中具有巨大的潜力和前景。目前,围绕智能高铁在行车控制、运行维护、运营管理、工程施工类等方面的通信业务需求,以5G-R为基础,积极开展面向低轨卫星互联网的智能高铁数据回传技术研究 with 验证,恰逢其时。

3 铁路低轨卫星通信关键技术

目前,学术界已经对LEO卫星通信作为陆地无线通信的补充和延伸达成共识^[17]。LEO卫星网络可作为5G-R的补充、延伸和备份,充分发挥卫星通信广域覆盖、按需接入、按需服务、安全可信等优势条件,重点应用于铁路沿线地面通信设施缺乏或薄弱的区段,在工程建造、运营维护、应急处置和灾害预警等场景下提供更加安全可靠的服务^[18]。本节将从信道传播特性、物理层参数特征、星内

与星间波束切换、星上资源管理几个方面对铁路低轨卫星通信关键技术进行分析。

3.1 信道传播特性

无线信道建模是人们对无线传播环境及其传播特性的抽象的描述,无线信道的传播特性是构建移动无线通信系统的基础部分,其应用在无线通信系统从设计评估到标准化再到最终部署的各个环节中,因此无线信道的传播特性和建模研究是设计、评估、部署任何无线通信系统的前提和基础。

LEO 卫星轨道高度为 500~2 000 km,处于外大气层,因此星间链路与星地链路中大气层段的传播方式为自由空间传播,长距离的传播使得自由空间损耗在星地传播损耗中占比最大。此外,随着通信频率的提高,高频段的传输使得大气中的水气、氧气分子,以及降雨和云雾天气时的水滴均会对星地传输信号造成衰减。在地面段传输时,地面的建筑物、森林、山体等障碍物也会对信号造成遮挡,产生额外的损耗。因此,LEO 卫星信道的传播特性不仅要考虑自由空间传播损耗,还需要考虑大气吸收、降雨及云雾衰减和阴影效应与地物损耗的影响,如图 1 所示。参考文献[19]在晴天、小雨、大雨、暴雨 4 种天气条件,以及通信仰角为 10°和 90°条件下对星地链路传播损耗进行仿真,结果表明随着降雨量的增加,降雨衰减占总衰减的比重逐渐增加,在暴雨时可达 84%,且随着通信仰角从 90°变化为 10°,总衰减在不同天气条件下有 30~50 dB 的增加,说明天气和通信仰角会对星地通信质量产生严重影响。

除了考虑信号在传播过程中产生的损耗,更重要的是要考虑双移动性,这是高铁卫星通信与其他通信场景的显著差异。一方面,LEO 卫星对地移动速度为 7.6 km/s,过顶时间较短,一颗卫星的可视时间只有约 10 min;另一方面,地面的列车也在以大约 350 km/h 的速度高速运动,因此卫星与列车的移动均会产生较大的多普勒频移,使得星地链路的信道是时变非平稳的。此外,由于高铁的移动,其周围的环境也具有动态变化的特点。在平原等开阔场景,卫星信号与高铁之间可视为 LoS 传播;在隧道或 U 型槽等场景,卫星信号到达高铁附近时则会产生严重的地物损耗,造成多径传播,且随着卫星与高铁相对位置的不同,通信仰角的不同,受到遮挡的影响也不同。因此,在进行高铁卫星场景的信道建模时,应当应对多样化场景,考虑星地双移动特点进行建模。

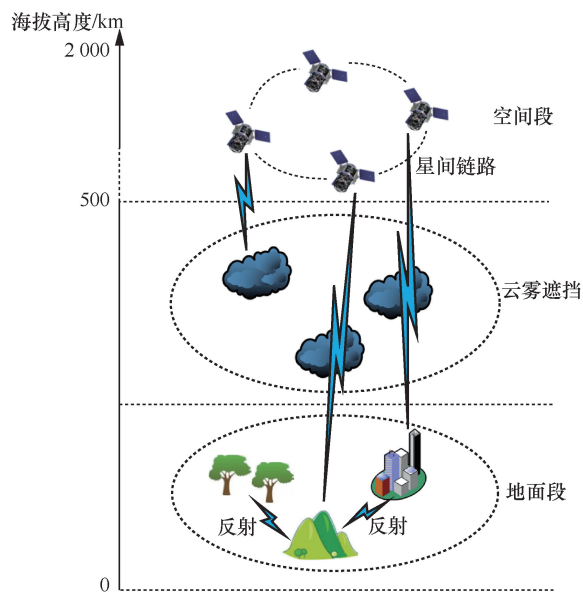


图1 低轨卫星传播链路模型

3.2 物理层参数特征

目前,5G-R 技术可为高铁提供大带宽、大连接、低时延的移动通信服务,因此 LEO 卫星通信系统可以考虑复用 5G-R 的关键技术。但是卫星通信系统相比于陆地蜂窝具有很大的差异性,特别是卫星高铁双移动导致的多普勒效应严重和频繁波束切换等问题,无法照搬 5G-R 通信系统。

针对上述的独特性,有必要对星地链路空中接口的部分物理层参数进行针对性的评估和优化,与 5G-R 进行技术体制融合。

(1) 在调制方式上,虽然 OFDM 作为 5G 关键技术已经非常成熟,但是由于需要保证子载波正交,其对载波频移非常敏感。在 LEO 与高铁双移动的高动态场景下,当频段达到 Ka、Ku 或更高频段时,多普勒频移将远高于 5G 参数集技术可提供的最大子载波间隔 240 kHz,这将会导致星地间频率同步更加困难,严重影响通信系统性能。虽然能够通过频率补偿技术降低多普勒频移造成的影响,但是对于星地双移动的高铁卫星通信场景会产生大量的计算开销,并不适用于计算资源紧缺的卫星终端^[20]。因此 OFDM 技术难以作为最优的智能高铁场景下低轨卫星通信系统调制方案。

正交时频空 (Orthogonal Time-Frequency Space, OTFS) 调制是一种新型的多载波调制技术,最早在参考文献[21]中被提出。不同于 OFDM 以子载波承载信息,OTFS 在时延-多普勒域上对符号复用传输,充分利用时间和频率分集,使每个符号都能够经历时不变平坦衰落信

道,可以有效对抗高移动性带来的大多普勒频移。此外,OTFS与OFDM技术有很好的兼容性,通过预编码和解码模块的加入就可以基于OFDM实现OTFS,且硬件复杂度增加较小^[22]。参考文献[23]证明了在高频段以及高速移动条件下,OTFS具备比OFDM更低的误码率,因此在低轨卫星通信中使用OTFS技术可以有效解决星地双移动场景下带来的信号传输问题,并且二者的兼容性也有利于星地链路空中接口波形的统一,实现一体化通信。

(2)在双工方式上,不同于传统主要支持电视广播、短消息的卫星通信,面向智能高铁的LEO星地通信存在频段资源紧缺、带宽需求大、上下行业务流量不对称的特点。若采用FDD制式,一方面难以在本就紧缺的频段上分配两个对称的大带宽,另一方面非对称业务会使几乎一半的带宽被浪费,带宽利用率极低。

TDD制式中上下行业务使用同一频率信道,可以节约宝贵的频谱资源,用于承载更多的用户终端,通过优化帧结构中的上下行时隙配比,可以有效提升频谱利用率,适应智能高铁非对称业务。此外,由于LEO轨道高度较低,因此TDD模式的传输时延也较低,并且TDD具备信道互易性的优势,能够为大规模天线波束成形技术提供简易的信道信息获取方式。另外我国从3G到4G对TDD的积累使其有能力成为5G中的主流通信制式^[24]。

TDD制式可能会出现上下行时隙间干扰,若帧结构中的保护时间间隔过短,则易出现终端自干扰;若同一波束内不同终端调度不当或波束间时隙配比不当,则易出现终端间干扰。因此在进行星地数据传输时,应综合考虑终端位置、邻波束时隙配比、历史调度信息等,通过合理的保护间隔设置与时隙配比,避免产生系统内及系统间干扰^[25]。

(3)在编码方案上,考虑到高铁卫星的双高速移动,其信道具备高动态性与时变非平稳的特征,基于链路自适应技术的自适应调制编码(Adaptive Modulation and Coding, AMC)可以用于卫星通信系统,其可以根据信道状态变化自主调整调制方式与编码速率。参考文献[26]针对卫星信道时变性提出了一种AMC方案,并且验证了该方案可以有效提高卫星通信的能量效率。

3.3 星内与星间波束切换

由于星地通信链路与地面通信链路在传播损耗上具有的差异,LEO卫星的频谱效率会远低于同期地面蜂窝通信系统。因此,为提升卫星通信的频谱效率,可以在星上采用多波束频率复用技术^[27]。最初,地面固定波束系统被提出,这种系统采用地面固定小区的方式,不需要进行频

繁的小区切换,但是要求卫星数量较多,部署成本较高,因此卫星固定波束系统更加合适,如铱星与全球星系统均采取卫星固定波束系统^[28]。在面向智能高铁的LEO星地通信场景中,卫星及高铁的高速双移动特点使信道动态变化更加严重,传统多波束卫星的波束成形网络变化速度较慢,难以适应如今的高动态星地信道。大规模MIMO技术作为5G的重要关键技术,可以使用灵活的数字多波束天线,实现动态重构的波束成形网络^[29],因此可以考虑在卫星侧构建大规模MIMO系统,根据高铁终端的信道状态实时调整波束方向及增益,提高系统性能,避免波束间干扰。目前星地信道模型主要针对传统多波束卫星,亟须建立大规模MIMO LEO星地信道模型。由于星地传输距离大,信道动态变化严重,难以根据瞬时信道信息进行波束成形设计,因此可以考虑根据统计信道信息进行波束成形设计^[30],即通过信道在相干时间内在时间维度上的统计信息进行波束成形。

由于卫星与高铁的双移动性,星地通信链路的多波束切换相较地面通信系统更为快速复杂,如对于工作在Ku频段的Starlink系统,单波束的星下点地表覆盖波束直径只有约30 km,平均每4 s就要进行一次切换。星内与星间波束切换示意如图2所示。频繁的切换会增大网络开销,降低频谱效率,也会造成卫星侧的计算与管理负担增大,可能会导致星地通信中断,影响智能高铁的安全运行与乘客的通信体验。因此,选择合适的技术进行高效稳定的波束切换非常重要。波束切换主要可分为星内波束切换与星间波束切换。

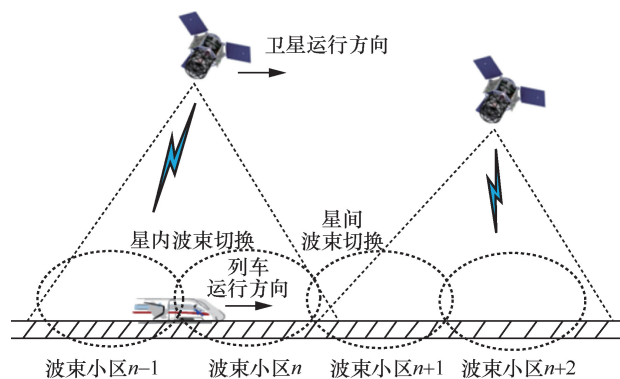


图2 星内与星间波束切换示意

星内波束切换:为了增大系统容量,单颗卫星的覆盖区域被划分为多个点波束,为保证稳定的电波覆盖,每个点波束范围内应采用等通量覆盖,即通过调整星上天线增益,使各个波束小区内的接收信号强度相等。在波束切换的过程中,用户或者信关站向卫星发起切换申请,并完成

切换决策、波束选择等行为。在这一过程中,高效的信道分配策略可以有效解决星地链路频谱利用率低的问题,主要可分为固定信道分配(Fixed Channel Allocation, FCA)、动态信道分配(Dynamic Channel Allocation, DCA)和自适应动态信道分配(Adaptive Dynamic Channel Allocation, ADCA)。

FCA 是为每个波束永久性分配信道资源,并在满足频率复用的距离后再度分配,这种方式虽然简单,但是在流量不对称的情况下会浪费信道资源,无法满足快速变化的业务需求^[31]。DCA 是将所有信道资源集中在一个资源池中,每个波束都可以依据需求选择合适的信道资源,这种方式具备更高的资源利用率,得到了广泛的研究。参考文献[32]提出一种 LEO 场景下基于不同业务优先级的 DCA 策略,其通过低轨卫星运动轨迹确定的特点预测网络流量,并建立马尔可夫信道分配模型,根据网络流量的变化情况动态调整阈值,有效降低了切换失败率。ADCA 在 DCA 的基础上进行改进,在动态分配的基础上进行信道资源的预留,使用预留信道为用户提供连接,进一步提高切换成功率;但要保证正常信道与预留信道之间的平衡,较多的预留信道会造成正常信道的拥塞,较少的预留信道则会降低切换的成功率。相比于 DCA, ADCA 可根据用户位置数据库来预测未来的切换,并预留信道资源,适合用于收发端运动轨迹都确定的高铁卫星通信场景。如参考文献[33]提出的 ADCA 可以依据当前用户位置信息与网络流量负载情况自适应地调整最佳预留信道数。

星间波束切换:由于 LEO 卫星移动速度快,为保证传输链路的连续性,地面终端必须具备支持跨星切换的波束指向快速调整能力,以快速进行星间切换,确保业务的连续性,因此除了波束小区的切换,星间切换也普遍存在。在选择切换卫星时,需要依据多种因素综合考虑,常用的策略有最短距离策略、最大覆盖时间策略、最大空闲信道数策略以及多因素综合加权策略^[34]。参考文献[35]将图论引入星间切换,将星间切换视为在有向图中寻找路径,并依据不同的切换标准设置链路权重,利用最短距离策略确定切换目标卫星。参考文献[36]针对大量用户同时切换且同时有多颗卫星提供接入的场景,使用博弈论进行星间切换,其根据用户的网络满意度、带宽满意度和所需带宽对所有用户进行分簇,由簇头决定接入卫星,卫星也会根据负载能力动态调整带宽价格,实现用户与卫星效用的最大化。然而基于图论和博弈论的策略均需要大量数据支持,目前大量获取卫星数据还较为困难,因此参考文献[37]使

用一种基于启发式超时策略的软件定义网络(Software Defined Networking, SDN)进行星间切换,并通过动态调整卫星空闲时间进行切换管理。此外,由于高铁和卫星运动轨迹是确定的,也可以通过预测波束切换小区与目标卫星的方式提前对信道资源进行分配,保障切换的无缝进行。

综上所述,LEO 与高铁的高速双移动以及大规模 MIMO 在卫星侧的应用会导致频繁的波束切换,采取高效的信道分配策略与基于运动轨迹的星间切换预测可以有效改善其造成的影响。通过与 5G-R 的融合,可以在有地面网络覆盖的区域使用地面网络,在地面网络缺乏或薄弱的区段使用 LEO 接入,进一步降低频繁切换带来的开销影响。

3.4 星上资源管理

智能高铁自身及铁路沿线设施业务需求量大、种类繁多,而 LEO 卫星资源有限,覆盖范围内业务分布存在时空不均衡的特点,这就使得星上资源管理与多波束负载均衡成为一个亟待解决的问题。

卫星和高铁双移动性的特点导致铁路低轨卫星通信与地面蜂窝通信相比,有两个显著特征:

(1) LEO 卫星在星上采用频率复用技术提升系统容量,而铁路沿线的监测节点、传感器节点等终端设备的部署密度与业务种类均存在差异,且列车的高速移动造成的频繁波束切换使得每个波束内的负载变化更加快速,导致单星下各个波束的负载存在不均匀与时变的特征,即“一对多”特点;

(2) 高铁列车顶部的相控阵天线在任意时刻都可观测到多颗卫星,不同卫星覆盖该列车终端的波束负载又不尽相同,且随着列车的移动可视卫星也在变化,因此如何选择合适的卫星进行通信也是一个重要问题,即“多对一”特点。

针对“一对多”特点,可以通过快速调整波束指向、进行波束赋形、预测卫星和列车运动轨迹等方式均衡负载,参考文献[38]使用“跳波束”技术将总覆盖区域预先设置为多个小区,在同一时刻仅对单个或多个小区服务,并通过对业务需求量大的小区倾斜更多资源来提高资源利用率。针对“多对一”特点,可以通过感知信道资源、多因素联合优化等方式选择合适的卫星,避免资源碰撞。

为了应对卫星互联网的资源管理问题,参考文献[39]最早将 SDN 引入卫星网络,作为一种新型网络架构,SDN 将网络的控制平面与数据平面分离,可以有效提高星地网络管理的灵活性,实现跨域资源调度。控制平面负责获取

全局网络状态,依据网络需求下发资源配置以及路由等指令,一般由地面站或非低轨卫星承载;数据平面则只负责数据转发操作,一般由 LEO 承载,从而很大程度上降低星上网络开销,将资源集中于数据转发^[40],适应高铁卫星通信场景下网络动态性高的特点。

对于大规模空间网络带来的信道占用大、控制成本高等问题,SDN 中控制器的部署位置对网络性能有重要影响。地面控制器计算及存储资源丰富,可以应对高动态场景的复杂计算,但是需要与天基网络频繁交换信息以获取网络拓扑变化;卫星控制器可以较为容易地获取网络整体的拓扑变化信息,但星上计算资源紧张,难以进行复杂场景的实时运算^[41]。因此,跨域 SDN 架构是一种较优的控制器部署形式,其将控制器同时部署于地面网络以及天基网络,可以利用地面强大的计算能力将控制成本下沉到地面网络,同时减少了星地网络拓扑信息交互,实现更高效的网络资源管理。参考文献[42]将控制器同时部署在地面、高空平台以及高轨卫星,利用其覆盖范围广的优势对控制信息分层管理,有效提高了对 LEO 的资源管理效率。以上方案中控制器均为静态放置,这种方案在流量波动剧烈的高动态场景中性能有所限制。参考文献[43]提出一种动态放置控制器的方案,并提出一个基于用户时空流量需求的数控平面流量交换模型,将其转化为整数线性规划问题,而最小化平均流建立时间。与静态放置控制器相比,当控制器数量大于 6 台时,动态放置控制器会具备更好的性能,但同时需要考虑控制器移位成本。

基于以上分析,“一对多”“多对一”特点的存在使得铁路卫星通信系统的资源管理问题相比地面网络更加复杂,需要针对业务时空分布不均,高铁卫星双移动的特点合理利用有限的星上资源。地面网络的广泛应用已经证明 SDN 可以有效促进异构网络融合,进行高效的资源管理,但同时也要对控制器的部署位置等因素进行深入研究。

4 结束语

卫星互联网已经成为我国“新基建”的重要组成部分,研究低轨卫星与铁路专网的互补发展,具有巨大的潜力和前景,有助于为智能高铁提供低成本、全覆盖、不间断的通信能力,必将在未来相当长一段时间内成为研究热点。本文所提技术将具有以下发展趋势。

第一,星地信道的测试与建模。星地信道建模需要综合考虑传输距离、气候条件、卫星仰角、终端移动性等多

个因素,但是目前还没有对所有因素进行统一考虑的星地信道模型。特别是高铁卫星通信场景具有收发端双高速移动的特点,这会导致更大的多普勒频移,并且列车的移动也会使得卫星通信仰角的变化更加复杂,从而使星地信道的变化更加复杂。因此,综合考虑列车的移动方向、移动速度,进行实地信道测量,建立双移动条件下统一的信道模型非常必要。

第二,卫星互联网与 5G-R 的融合。地面 5G 系统已经成熟,5G-R 作为铁路专网发挥了相比于 GSM-R 的优势。在天基网络中复用地面 5G-R 技术,无论在建设成本还是技术可靠性上都具备优势,因此有必要从物理层到应用层全协议栈对两种网络进行体制融合,采取统一的空中接口技术体制,对资源进行统一管理与调度,实现空天地一体化网络。

第三,波束切换管理。在星上采取大规模 MIMO 时,高铁的高速移动使其发生波束切换更为频繁,应当基于高铁与卫星的相对运动关系,建立波束切换预测模型,优化波束切换策略,使列车合理选择接入的波束。同时卫星侧也应当研究基于感知的信道、资源负载等信息快速智能地调整波束指向的方法,保障波束切换的稳定以及波束负载的均衡。

第四,智能资源管理与调度。为满足智能高铁多样化的业务需求,需要基于不同业务实施智能高效的资源管理和调度。如引入 SDN 对异构网络进行统一的资源管理,动态智能感知网络资源,合理部署控制器位置,利用网络切片提高网络资源利用率等。

参考文献

- [1] 王同军. 中国智能高速铁路 2.0 的内涵特征、体系架构与实施路径[J]. 铁路计算机应用, 2022, 31(7): 1-9.
WANG T J. Connotation, architecture and implementation path of China intelligent high-speed railway 2.0[J]. Railway Computer Application, 2022, 31(7): 1-9.
- [2] 中国国家铁路集团有限公司科信部. 铁路 5G 专网业务和功能需求暂行规范[S]. 2022.
Ministry of Science and Information Technology, China National Railway Group Co., Ltd. Provisional specification for service and function requirements of railway 5G private network[S]. 2022.
- [3] 钟章队, 官科, 陈为, 等. 铁路新一代移动通信的挑战与思考[J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(4): 44-50.
ZHONG Z D, GUAN K, CHEN W, et al. Challenges and perspective of new generation of railway mobile communications[J]. ZTE

- Technology Journal, 2021, 27(4): 44-50.
- [4] 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.
- 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.
- [5] JO O, KIM Y K, KIM J. Internet of things for smart railway: feasibility and applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2): 482-490.
- [6] FRAGA-LAMAS P, FERNÁNDEZ-CARAMÉS T M, CASTEDO L. Towards the Internet of smart trains: a review on industrial IoT-connected railways[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2017, 17(6): 1457.
- [7] 吴景林. 日本铁路的卫星利用[J]. 哈尔滨铁道科技, 1998(1): 27-28.
- WU J L. Satellite utilization of Japanese railways[J]. Harebin Railway Science & Technology, 1998(1): 27-28.
- [8] 蔡伯根. 低成本列控系统的列车组合定位理论与方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- CAI B G. Theory and method of train combination positioning in low-cost train control system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [9] 何永发. 基于北斗卫星的新型列控系统研究[J]. 铁道通信信号, 2022, 58(3): 7-10.
- HE Y F. Research on new-type train control system based on Beidou satellite[J]. Railway Signalling & Communication, 2022, 58(3): 7-10.
- [10] 刘江, 蔡伯根, 王剑. 基于卫星导航系统的列车定位技术现状与发展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(11): 4033-4042.
- LIU J, CAI B G, WANG J. Status and development of satellite navigation system based train positioning technology[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(11): 4033-4042.
- [11] NEUFELDT H. Next generation of Thales ADS-B ground stations - supporting the US surveillance broadcasting services system program[C]//Proceedings of 2008 Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications - Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-6.
- [12] DIETRICH F J, METZEN P, MONTE P. The Globalstar cellular satellite system[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(6): 935-942.
- [13] HENRI Y. The OneWeb Satellite System[M]// Handbook of Small Satellites. Cham: Springer, 2020: 1-10.
- [14] MCDOWELL J C. The low earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX starlink constellation[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2020, 892(2): L36.
- [15] SU M D, SU X, ZHAO Q L, et al. BeiDou augmented navigation from low earth orbit satellites[J]. Sensors, 2019, 19(1): 198.
- [16] 彭木根, 张世杰, 许宏涛, 等. 低轨卫星通信遥感融合: 架构、技术与试验[J]. 电信科学, 2022, 38(1): 13-24.
- PENG M G, ZHANG S J, XU H T, et al. Communication and remote sensing integrated LEO satellites: architecture, technologies and experiment[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(1): 13-24.
- [17] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议[J]. 电信科学, 2020, 36(6): 1-13.
- CHEN S Z. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 1-13.
- [18] 王开锋, 开祥宝, 李明, 等. 天地一体化信息网络在铁路领域的应用展望[J]. 天地一体化信息网络, 2021(1): 93-98.
- WANG K F, KAI X B, LI M, et al. Application prospect of space-integrated-ground information network in railway[J]. Space-Integrated Ground Information Networks, 2021(1): 93-98.
- [19] 乔艳丽, 田磊, 李志军, 等. 低轨卫星传播特性仿真与分析[J]. 移动通信, 2022, 46(3): 36-41.
- QIAO Y L, TIAN L, LI Z J, et al. Simulation and analysis on propagation characteristics of LEO satellite[J]. Mobile Communications, 2022, 46(3): 36-41.
- [20] 郭晟, 余乐, 朱立东. 星地场景下基于 CNN 的 OTFS 系统信道估计方法[J]. 天地一体化信息网络, 2022(3): 37-45.
- GUO S, YU L, ZHU L D. CNN-based channel estimation method for OTFS system in satellite-ground scenario[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022(3): 37-45.
- [21] MONK A, HADANI R, TSATSANIS M, et al. OTFS - orthogonal time frequency space[EB]. 2016.
- [22] 郭晟, 余乐, 燕贺云, 等. 基于 DNN 的 OTFS 系统信号检测方法[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(6): 808-814.
- GUO S, YU L, YAN H Y, et al. A DNN based signal detection method for OTFS systems[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(6): 808-814.

- [23] HADANI R, RAKIB S, MOLISCH A F, et al. Orthogonal time frequency space (OTFS) modulation for millimeter-wave communications systems[C]//Proceedings of 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). Piscataway: IEEE Press, 2017: 681-683.
- [24] CHEN S Z, ZHAO J. The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 36-43.
- [25] 孙耀华, 彭木根. 面向手机直连的低轨卫星通信: 关键技术、发展现状与未来展望[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 25-36.
- SUN Y H, PENG M G. Low earth orbit satellite communication supporting direct connection with mobile phones: key technologies, recent progress and future directions[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 25-36.
- [26] GHARSELLAOUI A E, GHANEM S A M, TARCHI D, et al. Energy efficient adaptive network coding schemes for satellite communications[C]//International Conference on Wireless and Satellite Systems. Cham: Springer, 2017: 202-212.
- [27] ARAPOGLOU P D, LIOLIS K, BERTINELLI M, et al. MIMO over satellite: a review[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011, 13(1): 27-51.
- [28] ZOU Q Y, ZHU L D. Dynamic channel allocation strategy of satellite communication systems based on grey prediction[C]//Proceedings of 2019 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [29] HONG W, JIANG Z H, YU C, et al. Multibeam antenna technologies for 5G wireless communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 6231-6249.
- [30] GAO X Q, JIANG B, LI X, et al. Statistical eigenmode transmission over jointly correlated MIMO channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(8): 3735-3750.
- [31] ZHENG F, PI Z, ZHOU Z, et al. LEO satellite channel allocation scheme based on reinforcement learning[J]. Mobile Information Systems, 2020: 1-10.
- [32] ZHOU J, YE X G, PAN Y, et al. Dynamic channel reservation scheme based on priorities in LEO satellite systems[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015, 26(1): 1-9.
- [33] CHO S, AKYILDIZ I F, BENDER M D, et al. A new connection admission control for spotbeam handover in LEO satellite networks[J]. Wireless Networks, 2002, 8(4): 403-415.
- [34] TUYSUZ A, ALAGOZ F. Satellite mobility pattern based handover management algorithm in LEO satellites[C]//Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2006: 1867-1872.
- [35] WU Z F, JIN F L, LUO J X, et al. A graph-based satellite handover framework for LEO satellite communication networks[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(8): 1547-1550.
- [36] 底晓强, 于力伟, 刘旭, 等. 一种基于演化博弈的低轨卫星切换算法研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2018, 54(4): 855-862.
- DI X Q, YU L W, LIU X, et al. Research on LEO satellite handover algorithm based on evolutionary game[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2018, 54(4): 855-862.
- [37] LI T X, ZHOU H C, LUO H B, et al. Timeout strategy-based mobility management for software defined satellite networks[C]//Proceedings of 2017 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Piscataway: IEEE Press, 2017: 319-324.
- [38] WANG Y, CHEN Y, QIAO Y F, et al. Cooperative beam hopping for accurate positioning in ultra-dense LEO satellite networks[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [39] BAO J Z, ZHAO B K, YU W R, et al. OpenSAN[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2015, 44(4): 347-348.
- [40] 王奎宇, 宋晓勤, 缪娟娟, 等. 基于 SDN 的高性能 QoS 保障低轨道卫星星间路由算法[J]. 计算机工程, 2022, 48(5): 185-190.
- WANG K Y, SONG X Q, MIAO J J, et al. SDN-based high-performance and QoS guaranteed inter-satellite routing algorithm for low-earth orbit satellites[J]. Computer Engineering, 2022, 48(5): 185-190.
- [41] 魏琳慧, 帅家成, 刘雨, 等. 软件定义的星地组网体系架构研究[J]. 信息通信技术与政策, 2021, 47(9): 47-54.
- WEI L H, SHUAI J C, LIU Y, et al. Research on integrated satellite and terrestrial network architecture based on software-defined networking[J]. Telecommunications Network Technology, 2021, 47(9): 47-54.
- [42] SHI Y P, CAO Y R, LIU J J, et al. A cross-domain SDN architecture for multi-layered space-terrestrial integrated networks[J]. IEEE Network, 2019, 33(1): 29-35.
- [43] PAPA A, DE COLA T, VIZARRETA P, et al. Dynamic SDN controller placement in a LEO constellation satellite network[C]//Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2019: 206-212.

[作者简介]



苏昭阳 (1998—), 男, 北京交通大学电子信息工程学院博士生, 主要研究方向为卫星通信、无线信道建模等。



周涛 (1988—), 男, 博士, 北京交通大学电子信息工程学院教授, 主要从事通信信号处理、无线信道测量与建模研究工作。



刘留 (1981—), 男, 博士, 北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为无线信道测量与建模、时变信道信号处理、5G 关键技术、高铁宽带接入物理层关键技术等。



蔺伟 (1976—), 男, 研究员, 主要从事铁路通信研究等工作。



张嘉驰 (1991—), 男, 北京交通大学电子信息工程学院博士生, 主要研究方向为宽带移动通信技术。



梁轶群 (1982—), 男, 研究员, 主要从事铁路通信基础理论研究、标准制定、应用业务、检验检测、工程设计等工作。