

中兴通识技术 ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

http://tech.zte.com.cn

2021年8月・第4期







《中兴通讯技术》第8届编辑委员会成员名单

. . .

. .

.

.

•

. . . .

.

. . .

. . .

.

.

顾问侯为贵(中兴通讯股份有限公司创始人) 钟义信(北京邮电大学教授) 陈锡生(南京邮电大学教授)
 主任陆建华(中国科学院院士)
 副主任李自学(中兴通讯股份有限公司董事长) 糜正琨(南京邮电大学教授)

编委(按姓名拼音排序)

.

.

. . .

• •

.

.

. . . .

. . .

.

陈建平	上海交通大学教授
陈前斌	重庆邮电大学教授、副校长
葛建华	西安电子科技大学教授
管海兵	上海交通大学教授
郭庆	哈尔滨工业大学教授
洪波	中兴发展股份有限公司总裁
洪伟	东南大学教授
黄宇红	中国移动研究院副院长
纪越峰	北京邮电大学教授
江涛	华中科技大学教授
蒋林涛	中国信息通信研究院科技委主任
李尔平	浙江大学教授
李红滨	北京大学教授
李厚强	中国科学技术大学教授
李建东	西安电子科技大学教授
李军	清华大学教授
李乐民	中国工程院院士
李融林	华南理工大学教授
李少谦	电子科技大学教授
李自学	中兴通讯股份有限公司董事长
林晓东	中兴通讯股份有限公司副总裁
刘健	中兴通讯股份有限公司高级副总裁
刘建伟	北京航空航天大学教授
陆建华	中国科学院院士
马建国	广东工业大学教授
孟洛明	北京邮电大学教授
糜正琨	南京邮电大学教授
任品毅	西安交通大学教授
石光明	西安电子科技大学教授、副校长
孙知信	南京邮电大学教授

谈振辉	北京交通大学教授、原校长
唐雄燕	中国联通研究院副院长
陶小峰	北京邮电大学教授
王文博	北京邮电大学教授、副校长
王文东	北京邮电大学教授
王喜瑜	中兴通讯股份有限公司执行副总裁
王翔	中兴通讯股份有限公司高级副总裁
卫国	中国科学技术大学教授
吴春明	浙江大学教授
邬贺铨	中国工程院院士
肖甫	南京邮电大学教授
解冲锋	中国电信研究院教授级高工
徐安士	北京大学教授
徐子阳	中兴通讯股份有限公司总裁
续合元	中国信息通信研究院副总工
薛向阳	复旦大学教授
薛一波	清华大学教授
杨义先	北京邮电大学教授
叶茂	电子科技大学教授
易芝玲	中国移动研究院首席科学家
张宏科	北京交通大学教授
张平	中国工程院院士
张卫	复旦大学教授
张云勇	中国联通集团产品中心总经理
赵慧玲	工业和信息化部通信科技委信息通信网络专家组组长
郑纬民	中国工程院院士
钟章队	北京交通大学教授
周亮	南京邮电大学教授
朱近康	中国科学技术大学教授
祝宁华	中国科学院半导体研究所研究员

目 次

中兴通讯技术 (ZHONGXING TONGXUN JISHU)

总第159期 第27卷 第4期 2021年8月

专题: 高铁智能通信技术与应用

- **专题导读 01** ^{艾渤}
- 智能化高铁车载缓存 **02** 崔新雨,刘玲,周一青,潘振岗
- 用于超高移动性信道的正交时频空调制 ()9 刘梦晓,周晶,张文逸
 - 智能反射面在高铁通信下的应用研究 14 王靖瑜, 鞠宏浩, 方旭明
- 基于 5G-R 业务的高速铁路异构网络接入技术 18 李翠然,谢健骊,高文娟
 - **面向高速移动的毫米波信道估计** 24 左世元,范戎飞
 - 高速铁路高架桥场景中的复合无线信道特性 30 张逸康, 王公仆, 叶如意

36 智能超表面技术在智能高铁通信场景的应用探讨 赵亚军,章嘉懿,艾渤

专家论坛

44 铁路新一代移动通信的挑战与思考 钟章队, 官科, 陈为, 艾渤

企业视界

51 5G 半导体产业发展和创新趋势思考 _{刘新阳}

技术广角

- 53 5G 毫米波通信中的物理层安全预编码 倪云云,陈伯庆,李刚
- 60 Nature Flow:新转发架构赋能未来数据中心网络 商志彪,雷波,郭茜



CONTENTS

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol. 27 No. 4 Aug. 2021

Special Topic:

Technologies and Applications of High–Speed Railway Intelligent Communications

Editorial **01**

- Intelligent High–Speed Railway Onboard Caching O2 CUI Xinyu, LIU Ling, ZHOU Yiqing, PAN Zhengang
 - Orthogonal Time Frequency Space Modulation for Channels with Very High Mobility LIU Mengxiao, ZHOU Jing, ZHANG Wenyi
 - Applications of Intelligent Reflecting Surface in High–Speed Railway Communications WANG Jingyu, JU Honghao, FANG Xuming
- Heterogeneous Network Access Technologies Based on 5G–R Services for High–Speed Railway LI Cuiran, XIE Jianli, GAO Wenjuan
 - Channel Estimation for mmWave Communications under High–Speed Mobility ZUO Shiyuan, FAN Rongfei
- Composite Wireless Channel Characteristics for Communication Systems on Viaducts of High–Speed Railway ZHANG Yikang, WANG Gongpu, YE Ruyi

36 Applications of Reconfigurable Intelligent Surface in Smart High–Speed Railway Communications ZHAO Yajun, ZHANG Jiayi, AI Bo

Expert Forum

44 Challenges and Perspective of New Generation of Railway Mobile Communications ZHONG Zhangdui, GUAN Ke, CHEN Wei, AI Bo

Enterprise View

51 Reflections on Development and Innovation Trend of 5G Semiconductor Industry LIU Xinyang

Technology Perspective

- 53 Physical Layer Secure Precoding in 5G Millimeter Wave Communication Systems NI Yunyun, CHEN Boqing, LI Gang
- 60 Nature Flow: A New Forwarding Architecture Improves Future Data Center Network SHANG Zhibiao, LEI Bo, GUO Xi

期刊基本参数: CN 34-1228/TN*1995*b*16*66*zh*P*¥20.00*6500*12*2021-08

敬告读者

本刊享有所发表文章的版权,包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版版权,所支付的稿酬已经包含上述各版本的费用。 未经本刊许可,不得以任何形式全文转载本刊内容;如部分引用本刊内容,须注明该内容出自本刊。



高铁智能通信技术与应用专题导读

专题策划人



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。

近年来,高铁智能无线通信技术受到全球学术界和工 业界的极大关注。中国国家铁路集团在其发布的《新时代 交通强国铁路先行规划纲要》中提出,到2035年,智能高 铁率先建成,智慧铁路加快实现。未来铁路发展对无缝高 数据速率通信、信号覆盖范围等提出更高要求。随着智能 高铁业务的持续增多和应用需求的不断提升,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 据速率的持续在线可靠传输。同时,随着5G在全球的部署 和6G的进一步研究,人工智能、智能超表面、云计算等先 进技术有望被应用于高铁智能通信。

智能铁路的关键挑战之一是在各种铁路场景下实现高数据率的可靠信息传输。本期专题围绕高铁通信场景下的移动通信关键技术展开深入讨论。《智能超表面技术在智能高铁通信场景的应用探讨》探讨了智能超表面(RIS)技术在智能高铁通信场景应用中的关键技术和面临的机遇与挑战;《智能反射面在高铁通信下的应用研究》提出了一种智能反射面(IRS)辅助的高铁通信方案;《用于超高移动性信道的正交时频空调制》比较了正交时频空(OTFS)与正交频分复用(OFDM)技术在超高速移动下的性能,指出 OTFS 有望在支持超高移动性信道可靠通信方面发挥重要作用;基于信道路径角度在高速移动情况下的变化规律,《面

向高速移动的毫米波信道估计》构建了信道测量体系;基 于瑞利信道模型和莱斯信道模型,《高速铁路高架桥场景 中的复合无线信道特性》推导出了两种新的概率密度函数; 针对未来高铁通信中5G-R业务的异构无线网络接入问题, 《基于5G-R业务的高速铁路异构网络接入技术》提出了 一种基于马尔可夫决策过程(MDP)的网络接入算法;针 对高铁车载缓存系统在内容放置、请求调度、内容分发阶 段面临的问题,《智能化高铁车载缓存》总结了相应的智 能化解决方案。

本期文章的作者均来自中国的知名高校和一线科研机构。针对高铁智能通信技术与应用,专题文章从系统建模、 通信设计、性能评估等方面介绍了最新的研究成果和经验, 希望能为读者提供有益的借鉴与启示。在此,对所有作者 和专家的大力支持表示由衷的感谢!

> **艾渤** 2021年7月25日

DOI: 10.12142/ZTETJ.202104001 收稿日期: 2021-07-10

智能化高铁车载缓存

Intelligent High-Speed Railway Onboard Caching

崔新雨 /CUI Xinyu^{1,2,3},刘玲 /LIU Ling^{1,2,3},周一青 /ZHOU Yiqing^{1,2,3},潘振岗 /PAN Zhengang⁴

(1. 中国科学院计算技术研究所,中国 北京 100190;

- 2. 移动计算与新型终端北京市重点实验室,中国北京 100190;
- 3. 中国科学院大学,中国北京 100049;
- 4. 北京紫光展锐通信技术有限公司,中国 北京 100190)
- (1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
- 2. Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Beijing 100190, China;
- 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
- 4. Beijing Unisoc Technologies Co., Ltd., Beijing 100190, China)

摘要:通过对高铁车载缓存系统的概念、在工作流程的各个阶段遇到的问题以及相应的智能化 解决方案进行详细介绍,指出高铁车载缓存可以有效地减少移动设备与路边基站直连通信的次 数,提升乘客的内容服务体验。但是,高铁车载缓存系统在实际的应用中仍然存在诸多问题, 具体包括高铁与路边基站的协同缓存、乘客请求数据缺失下的请求规律挖掘,以及通信、计算、 缓存资源的联合管控。

关键词: 高铁通信; 车载缓存; 智能

Abstract: An overview of the basic idea of the high-speed railway onboard caching system is presented. The main challenges at each stage of the workflow and the corresponding intelligent solutions are detailed. It is pointed out that the high-speed railway onboard caching can effectively reduce the number of direct communications between mobile devices and roadside base stations, improving the quality of service of passengers. However, there are still many problems to be solved in practice, including the collaborative caching of high-speed railway and roadside base stations, the mining of request features when passenger request data is missing, and the joint management and control of communication, computing, and caching resources.

Keywords: high-speed railway communications; onboard caching; intelligence

近年来,高铁凭借其较高的行驶速度、舒适的乘车体验等优点,逐渐成为人们优选的远途出行方式。同时,随着移动通信技术的飞速发展¹¹⁻⁶,在搭乘高铁时,乘客出于娱乐、办公等目的,可以通过手机等移动通信设备发起对视频等多媒体业务内容的请求¹⁷。不同于用户在静止或低速移动状态下通过移动通信设备与基站建立

通信连接,高铁场景下移动通信设备 与路边基站的直连通信面临着3个主 要问题^图。

(1)封闭式金属车厢引起的信号 衰减。高铁车厢多采用金属全封闭式 的结构,无线信号在穿过金属车厢时 会受到较大的穿透损耗。

(2)高速移动引起的连接不稳定。 由于路边基站的覆盖范围有限,高铁 的高速移动将引起频繁的基站切换, 从而影响移动设备与路边基站连接的 稳定性。 (3)高速移动引起的多普勒频 移。高铁与路边基站之间的相对运动 会引起严重的多普勒频移,从而会影 响无线信号的正确接收与解调。尤其 是4G/5G采用的正交频分复用技术, 对载波频率偏移十分敏感。

在高铁通信场景下,面向具有较 大带宽、较低时延需求的多媒体类业 务,移动通信设备与路边基站直连的 方式通常难以满足业务的服务质量需 求,乘客在观看视频时将面临频繁播 放卡顿、加载慢等问题,观看服务体

DOI: 10.12142/ZTETJ.202104002 网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/ detail/34.1228.TN.20210722.1429.006.html

网络出版日期:2021-07-23 收稿日期:2021-06-20



基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(619 01452);国家重点研发计划(2020YFB1806900)

智能化高铁车载缓存 ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

验受到严重影响。

为了带给乘客更优的服务体验, 可以在高铁上应用车载缓存技术^[9-10]。 通过在高铁上搭载缓存服务器,并在 服务器中预先缓存乘客可能会请求的 内容,使得乘客请求有一定的概率被 车载缓存服务器就近响应,避免乘客 移动通信设备与路边基站的直连通信。 本文将结合现有研究,概述高铁车载 缓存系统,分析高铁车载缓存系统面 临的主要问题并总结相应的智能化解 决方案,同时讨论高铁车载缓存系统 未来面临的挑战,为车载缓存技术在 高铁中的智能应用提供参考。

1 高铁车载缓存系统

本节中,我们将从系统架构、用 户请求规律、系统工作流程的角度对 高铁车载缓存系统进行概述。

1.1 系统架构

高铁车载缓存系统架构由4部分 组成,分别是高铁车载缓存服务器、 高铁车载中继通信系统、路边接入网 和云端计算中心,如图1所示[12-13]。 高铁搭载了一定容量的缓存服务器, 负责存储内容,调度用户请求,为乘 客提供就近的内容接入服务。高铁车 载中继通信系统由无线接入点和中继 站组成,无线接入点分布在各节车厢, 中继站安装在高铁顶部,无线接入点 与中继站之间通过有线连接。乘客、 车载缓存服务器分别通过无线、有线 的方式接入车载中继通信系统,通过 中继通信的方式与路边基站建立连接, 以避免信号穿过车厢所产生的穿透损 耗,获得更优的信号质量。此外,若 乘客请求的内容被车载服务器所缓存, 缓存内容将直接经车载中继通信系统 发送给乘客。路边接入网由部署在铁 路沿线的路边基站组成,为乘客提供 移动网络接入服务。云端计算中心部 署了内容源服务器,源服务器中存储 了网络中的所有内容。云端计算中心 经核心网与路边基站相连,当乘客请 求的内容未被车载缓存服务器缓存时, 将由源服务器为乘客提供所需内容。

1.2 用户请求规律

用户对内容的请求具有一定的统 计规律,这些统计规律是高铁车载缓 存系统工作时的重要参考依据。用户 整体发起的内容请求通常服从 ZipF 定 律,即少量内容吸引了大部分用户对 其发起请求,而剩余的大量内容则很 少受到用户们的关注¹¹¹。这部分少量 内容也被称为热点内容。研究中常用 流行度表示内容受用户请求的频次, 热点内容具有较高的流行度,非热点 内容具有较低的流行度。在较短的时 间内(例如一天),内容流行度并不 会发生显著的变化。

对于用户个体而言,常用喜好分 布对用户过去一段时间的请求规律进 行描述,喜好分布代表了用户对各个 内容的喜好程度。喜好分布是极具个 性化的,某一用户个体可能会对热点 内容完全不感兴趣,不同用户的喜好 分布也可能完全不同。由于喜好分布 是根据用户以往的请求历史记录计算 生成的,所以喜好分布仅能在一定程 度上反应用户未来的请求倾向,用户 未来的请求行为还会受到推荐系统、 社交关系等多重因素的影响。

统计技术、智能化预测技术等可 以量化内容的流行度和用户的喜好分 布,为缓存内容的放置提供参考。在 高铁场景下,得益于可提前获取乘客 的班次信息,车载缓存系统可在列车 启程前统计乘客的喜好分布,推算内 容流行度,针对性地缓存乘客群体可 能会请求的内容。

1.3 系统工作流程

高铁车载缓存系统的工作流程分为3步,分别是内容放置、请求调度 与内容分发、内容更新^[13]。

(1)内容放置。高铁驶离始发站



[▲]图1 高铁车载缓存系统架构

之前,车载缓存服务器可以获得搭乘 本次高铁的乘客信息,并统计乘客们 的喜好分布、乘客群体的内容流行度 等能够反映乘客请求倾向的关键参考 特征,然后根据这些关键参考特征, 选择乘客可能会在乘车过程中请求的

(2)请求调度与内容分发。车载 缓存服务器具备调度用户请求的功能。 乘客在搭乘高铁的过程中发起对内容 的请求后,车载缓存服务器将检测用 户请求的内容是否被缓存,并根据检 测结果对用户请求进行调度。如果车 载缓存服务器缓存了乘客请求的内容, 车载缓存服务器将通过中继通信系统 向乘客分发缓存内容。如果乘客请求 的内容未被车载服务器缓存,车载缓 存服务器则将乘客请求转移至云端计 算中心的内容源服务器处,由源服务 器向用户分发请求内容。

(3)内容更新。高铁由始发站驶 向终点站的过程中将途径多个中间站, 乘客的流动使得缓存内容也需要进行 相应的调整。高铁到达下一站点之前, 车载缓存服务器将根据乘客在下一站 点的流动状况对缓存内容进行更新, 用上车乘客可能会请求的内容替换下 车乘客可能会请求的内容。

2 高铁车载缓存面临的主要问题

高铁车载缓存系统在工作过程中 会受到多方面的制约,影响缓存资源 发挥效用。本节将分析高铁车载缓存 面临的主要问题,包括内容放置阶段 面临的缓存容量受限、请求调度阶段 面临的请求随机性大、内容分发阶段 面临的无线资源受限问题以及业务场 景支持单一的问题。

2.1 内容放置阶段面临缓存容量受限的 问题

云端计算中心的源内容服务器存

储了动辄拍字节级的海量内容,但车 载缓存服务器的容量通常在太字节级 左右,只有较小比例的内容能被高铁 车载缓存服务器缓存。通常,人们使 用缓存命中率作为衡量缓存资源效用 的指标。缓存命中率等于用户请求被 缓存服务器满足的次数占用户请求总 次数的比例,缓存命中率越高代表缓 存资源越能得到充分利用。缓存容量 受限增加了内容放置阶段的难度,选 择哪些内容进行缓存直接决定了缓存 命中率的高低。

2.2 请求调度阶段面临请求随机性大的 问题

从提升乘客请求服务体验的角度 出发,如果乘客的请求可以直接被车 载缓存服务器满足,那么乘客可以获 得低时延的请求服务体验,从而避免 所提请求被调度至云端计算中心的情 况。但是,乘客的请求行为在个人喜好、 推荐系统、社交关系等多重因素的影 响下较为随机,乘客根据个人喜好做 出的选择,可能会受到推荐系统的影 响而临时改变。此外,受社交关系的 影响,乘客也可能会请求与个人喜好 不匹配但受家人推送的内容。乘客请 求的随机性,增加了请求被调度至云 端计算中心的概率,降低了请求平均 时延的性能。

2.3 内容分发阶段面临无线资源受限的 问题

乘客的移动通信设备与高铁中继 通信系统之间通过无线的方式建立连 接。由于无线中继通信系统频谱资源 有限,当较多的乘客发起请求,特别 是请求超高清视频等大带宽业务内容 时,容易引起网络拥塞,从而影响分 发时延。即便在缓存命中率较高的情 况下,如果网络拥塞问题不能解决, 同样会影响到用户的服务体验。缓存 资源与通信资源需要进行协同才能最 大限度地发挥缓存资源的效用。

2.4 业务场景支持单一的问题

缓存服务器可以对多种业务提供 缓存服务,如小文件加载、大文件下载、 音视频点播等。小文件主要来自于各 类门户网站的 html、js、jpg 等网页素 材,使用缓存服务器对网页的小文件 进行加速,可以减少连接的建立时间、 首包时间等,优化网页的加载时间; 大文件是指大小在20 MB以上的文件, 例如应用安装包、应用更新包等,通 过缓存服务器的加速,可以提升下载 速度,减少下载总时间;音视频点播 业务来自于各类音视频网站,缓存服 务器通过对 MP4、Flash 视频(FLV) 等主流的视频格式进行缓存,可以降 低音视频的卡顿率,优化首播时间等。 目前高铁缓存服务器仅对音视频点播 业务进行了较好的支持,但仍需对小 文件加载和大文件下载业务进行进一 步优化,以提升乘客在浏览门户网站、 下载大文件时的体验。

3 智能化高铁车载缓存关键技术

智能技术的发展为上述部分问题 的解决提供了新的思路,本节分别针 对高铁车载缓存系统在内容放置、请 求调度、内容分发阶段面临的主要问 题,总结相应的智能化解决方案,包 括基于深度学习的缓存内容放置、基 于内容推荐的用户请求调度和基于编 码缓存的缓存内容分发。

3.1 基于深度学习的缓存内容放置

缓存容量的受限为缓存内容的放 置带来了一定的挑战,选择哪些内容 进行缓存将直接影响缓存命中率。为 了在缓存容量受限的条件下尽可能地 发挥缓存资源的效用,可以使用深度 学习技术提高内容流行度的预测精度,

内容存入服务器。

从而为缓存内容的放置决策提供更加 可靠的参考信息^[14]。

文献[14]在缓存服务器中引入了 深度学习模块,如图2所示。缓存服 务器除了具备基本的缓存资源、缓存 资源管理器,还额外引入了与深度学 习相关的内容特征数据库、流行度预 测器、人工智能加速卡。缓存资源是 内容存储的物理媒介,缓存资源管理 器根据内容流行度的预测结果负责内 容的放置、删除与更新。内容特征数 据库负责采集乘客在过去一段时间的 内容请求特征、乘客搭乘高铁出行时 的内容请求特征、各内容的类别特征 等,构建训练神经网络所需的数据集。 流行度预测器内置流行度预测模型, 预测模型可以从内容特征数据库中提 取数据训练深度神经网络,并输出深 度神经网络预测的内容流行度,供缓 存资源管理器进行决策。人工智能加 速卡负责加速深度神经网络的训练, 使得流行度的预测精度可以尽快收敛。 根据数据集规模的大小以及深度神经 网络模型的复杂程度,高铁可以动态 地配置缓存服务器中的人工智能加速 卡资源,避免加速资源浪费或不足的 问题。

缓存服务器内置的流行度预测模 型采用双向长短期记忆网络,该网络

由两个循环神经网络的变体组成,分 别是双向循环神经网络和长短期记忆 网络。循环神经网络是一种典型的深 度学习模型,适合处理序列信息。例如, 对内容流行度在过去一段时间的变化 进行采样而得到的流行度序列信息。 双向循环神经网络由两个循环神经网 络组成,两个循环神经网络分别采用 从前向后、从后向前的方式处理序列 信息。在循环神经网络的基础上,长 短期记忆网络对网络单元进行了改进, 使用具备门系统、更多参数的细胞替 代原有的网络单元, 使得其在处理长 信息序列方面更有优势。双向长短期 记忆网络在双向循环神经网络的基础 上,将隐藏层的每个单元替换为长短 期记忆细胞。考虑到缓存服务器的计 算能力和内容流行度预测精度需求, 可以对双向长短期记忆网络的隐藏层 层数进行一些动态的调整。

缓存服务器在进行缓存内容放置 时,将依次经历数据预处理、基于深 度学习的流行度预测、内容缓存3个 过程。由于误操作等因素,个别用户 产生的流行度序列信息存在异常,不 能反映整体的流行度变化趋势,因此 在训练神经网络之前需要对数据进行 预处理,剔除异常的流行度序列信息。 预处理后的数据被输入至双向长短期



记忆网络, 网络经过一定次数的迭代 训练, 待预测精度、交叉熵损失函数 等反应训练效果的指标达到阈值后, 将停止训练, 输出对未来内容流行度 的预测值。缓存资源管理器根据内容 流行度的预测结果, 选择流行度最高 的内容存入缓存资源。

在高铁车载缓存的场景下,可以 在车载缓存服务器中引入基于深度学 习的内容流行度预测模块。车载缓存 服务器根据提前获知的列车乘客搭乘 信息,获取乘客的历史请求记录,再 通过深度学习技术对乘客群体的内容 流行度进行精准预测,从而针对性地 缓存乘客群体可能请求的内容。这样 可以在缓存容量受限的条件下,提高 缓存资源的效用。

3.2 基于内容推荐的用户请求调度

在请求调度阶段,乘客请求被车 载缓存服务器满足得越多,平均请求 时延就越低:但较大的乘客请求随机 性使得大量的乘客请求被调度至云端 计算中心,影响了车载缓存资源的效 用,以及平均请求时延的性能。考虑 到用户的请求易受推荐系统的影响, 文献 [15] 和 [16] 提出通过向用户推荐 缓存内容来降低其请求的随机性,从 而提升用户请求缓存内容的概率。上 述文献的不同之处在于: 文献 [15] 提 出了一种硬推荐机制,在用户发起请 求前,向用户推荐缓存内容;而文献[16] 提出了一种软推荐机制,待用户发起 请求后,如果用户请求的不是缓存内 容,再向用户推荐服务体验更佳的缓 存内容,并询问用户是否改变自己的 请求,具体如图3所示。

文献 [15] 首先量化建模了用户对 内容的请求概率。在模型中,用户对 内容的请求概率大小受用户喜好分布 与推荐系统的双重影响,且不同用户 受推荐系统影响的程度不一。对于推

崔新雨 等



▲图3 缓存内容软推荐

荐给用户的内容,由于该内容获得了 一定的曝光度,所以用户请求推荐内 容的概率会获得一定幅度的提升;对 于未推荐给用户的内容,由于用户被 推荐内容所吸引,因此用户请求未推 荐内容的概率会有一定幅度的下降。

通过上述模型,可以估算推荐系 统向用户推荐缓存内容后,用户对缓 存内容的请求概率。在用户发起请求 前,选择推荐后请求概率最高的几个 缓存内容并推荐给用户,以增加缓存 内容的命中率。值得注意的是,推荐 系统的初衷是帮助用户发现感兴趣的 内容,如果缓存内容与用户喜好相差 较多,则不会被推荐给用户。

在文献[16]提出的软推荐机制下, 推荐系统在用户发起请求前向用户推 荐内容,但不考虑推荐的内容是否被 缓存。待用户发起请求后,缓存服务 器检查用户请求的内容是否被缓存, 如果用户请求的内容未被缓存,则再 通过推荐系统进行二次推荐,向用户 推荐符合用户喜好且缓存了的内容。 在二次推荐时,推荐系统将对用户做 出提示,请求二次推荐的内容可以获 得更好的服务体验,用户可以根据需 求自行决定是否改变原有的请求,请 求二次推荐的内容。

在高铁场景下,可以利用智能化 的推荐系统,使用硬推荐或软推荐机 制向乘客推荐车载缓存服务器中缓存 的内容,以避免用户的请求被调度至 云端计算中心,从而提高车载缓存服 务器的服务效率。

3.3 基于编码缓存的缓存内容分发

对高铁实际网络数据的分析表明, 其每分钟的活跃乘客数量保持在100 人左右,约占8编组列车满员人数的 1/5,每分钟的活跃乘客数量峰值可达 200 人左右^[17]。由于无线中继通信系 统的频谱资源有限,当较多的乘客发 起请求时,系统容易引起网络拥塞。 文献[18]提出了一种基于用户与接入 点协同的编码缓存机制,通过在流量 负载低峰期向用户本地的存储资源中 缓存特定的子文件,接入点可以在流 量负载高峰期通过异或编码多播的方 式进行分发。相比于非编码缓存,编 码缓存可以大幅减少高峰期的流量负 载,降低对有限频谱资源的要求。

为了阐述编码缓存的机理,图4

给出了一个编码缓存的简单例子。其 中, 接入点(如基站)缓存了两个大 小为F的文件A、B, 分别被分割为 两个大小相同的子文件 A₁、A₂、B₁、 B₂; 用户1、2具有相同容量的本地缓 存资源,均可以缓存两个子文件,接 入点与用户之间通过无损无线链路建 立连接。在流量负载低峰期(如深夜) 对子文件进行缓存放置,如图4中左 图所示, 用户1缓存子文件A₁、B₁, 用户2缓存子文件A2、B2。当用户在 流量负载高峰期提出文件请求时,例 如用户1请求文件A,用户2请求文 件 B, 系统将进行子文件的分发。如 图 4 中右图所示,由于用户 1 缺少子 文件 A₂, 用户 2 缺少子文件 B₁, 那么 接入点可以将子文件 A2 和 B1 进行异 或操作形成编码子文件 A₂ ⊕ B₁, 然 后通过多播的方式发送给用户1、2。 用户1将本地缓存的子文件 B1 与编码 子文件 A₂ \oplus B₁ 再次进行异或操作, 即可得到所需的子文件 A,; 用户 2 将 本地缓存的子文件 A2 与编码子文件 A₂ ⊕ B₁ 再次进行异或操作,即可得到 所需的子文件 B₁。由于异或操作并不 改变文件大小,所以上述分发过程中 产生的数据量为 F/2。而在非编码缓存 机制下, 接入点需要分别向用户1发 送 A₂,向用户 2 发送 B₁,分发过程中 产生的数据量为F。可见,编码缓存 较非编码缓存可以降低分发时的流量 负载。

文献 [18] 从理论的角度证明了编 码缓存机制的优越性。在用户数量为 K、文件总量为N、用户本地缓存容量 为M的情况下,编码缓存机制下的流 量负载是非编码缓存机制下流量负载 的 1/(1+KM/N)倍,理论最优流量负载 下界最多是编码缓存机制下的流量负 载的 1/12。相比于非编码缓存机制够 能大幅降低流量负载,采用编码缓存 机制能够有效降低对频谱资源的需求。 专题

智能化高铁车载缓存 ZTE TECHNOLOGY JOURNAL



▲图4 编码缓存简例

在高铁场景下,可以在乘客乘车 前按照一定的规则,在乘客的移动通 信设备上缓存子文件。乘客在乘车的 过程中,通过异或编码多播的方式获 得缺失的子文件,以降低中继通信系 统在高峰期的流量负载压力,避免网 络拥塞。

4 未来挑战

高铁车载缓存相关的研究虽然已 取得了一定的进展,在实际中也获得 了一定的应用,但仍然存在许多需要 解决的问题。本节对其中的3个主要 问题进行讨论,包括高铁与路边基站 的协同缓存,乘客请求数据缺失下的 请求规律挖掘,以及通信、计算、缓 存资源的联合管控。

(1)高铁与路边基站的协同缓存 缓存服务器可以部署在高铁中, 也可以部署在铁路沿线的路边基站中。 当高铁车载缓存服务器无法满足乘客 请求时,可以将乘客请求调度至路边 基站的缓存服务器中。如果路边基站 的缓存服务器无法满足用户请求,再 将用户请求调度至云端计算中心。通 过这种两级缓存的方式,可以增加乘 客就近获得请求内容的概率,降低乘 客平均请求时延。但是,由于高铁是 高速移动的,且在各个路边基站覆盖 范围内的停留时间较为短暂,这导致 路边基站需要在较短的时间内完成缓 存内容的分发。因此,高铁与路边基 站如何协同缓存内容的放置,在有限 的时间内完成缓存内容的顺利分发是 未来需要解决的一个难点问题。

(2)乘客请求数据缺失下的请求 规律挖掘

缓存内容的放置取决于乘客的请 求规律,而乘客请求规律的挖掘需要 乘客请求历史数据的支持。但是,大 部分的请求历史数据受到隐私协议的 保护,因此车载缓存服务器所能获得 的历史请求数据是不完整的。同时, 部分乘客的请求历史数据较少,即便 隐私授权后可以得到全部的请求历史 数据,也不足以支持对乘客请求规律 进行挖掘。因此,还需进一步探索智 能化技术在高铁车载缓存中的应用, 在乘客请求历史数据集较小情况下, 提高请求规律挖掘精度。

(3)通信、计算、缓存资源的联 合管控

高铁车载缓存服务器可以为传统 的多媒体类业务提供良好的支持,但 对虚拟现实、增强现实等新兴的计算 密集型业务而言,仅有缓存服务器的 支持是不够的,还需要在高铁上搭载 移动边缘计算服务器进行协助。不同 的业务对通信、计算、存储资源的需 求是不同的。为了满足不同业务的服 务质量需求,人们需要设计高效的资 源分配机制,从而对高铁车载通信、 计算、缓存资源进行合理调度。

5 结束语

受高铁全封闭式金属车厢引起的 穿透信号损耗、高铁高速移动引起的 通信连接不稳定和多普勒频移等因素 的影响,乘客移动设备与路边基站直 连的通信方式往往难以保障乘客的通 信服务体验。高铁车载缓存技术通过 在高铁上搭载缓存服务器,并在缓存 服务器中预先存储乘客未来可能请求 的内容,使得乘客未来的请求有一定 几率被缓存服务器就近满足,移动通 信设备无须与路边基站进行直连通信。

本文首先从系统架构、用户请 求特性、系统工作流程等方面对高铁 车载缓存系统进行了概述,然后分析 了缓存放置阶段面临的缓存容量受限 问题、请求调度阶段面临的请求随机 性较大问题、内容分发阶段面临的无 线资源受限问题以及业务场景支持单 一的问题。针对上述的问题,我们分 别总结了相应的智能化解决方案,通 过使用深度学习技术对内容流行度进 行精准预测,为缓存内容的放置提供 更可靠的参考依据:考虑乘客的请求 易受推荐系统的影响,通过推荐系统 向乘客推荐缓存内容,以降低乘客请 求的随机性;通过人车协同,在乘客 移动设备中预先缓存精心设计的子文 件, 使得缓存内容可以通过编码多播 的方式分发给乘客,降低对无线通信 资源的需求。高铁车载缓存技术的发 展仍面临诸多挑战,例如高铁与路边 基站的协同缓存,乘客请求数据缺失 下的请求规律挖掘,通信、计算、缓 存资源的联合管控等。上述挑战的解 决将有利于高铁车载缓存资源进一步 发挥效用,为乘客带来更好的通信服 务体验。

致谢

特别感谢中国科学院计算技术研 究所曹梦华、邢旺同学在文章撰写过 程中提供的大力支持。

参考文献

- [1] ZHOU Y Q, LIU L, WANG L, et al. Service aware 6G: an intelligent and open network based on convergence of communication, computing and caching [J]. Digital communi– cation networks, 2020, 6(3): 253–260. DOI: 10.1016/j.dcan.2020.05.003
- [2] LIU L, ZHOU Y Q, YUAN J H, et al. Economically optimal MS association for multimedia content delivery in cache–enabled heteroge– neous cloud radio access networks [J]. IEEE journal on selected areas in communica– tions, 2019, 37(7): 1584–1593. DOI: 10.1109/ JSAC.2019.2916280
- [3] LIU L, ZHOU Y Q, GARCIA V, et al. Load aware joint CoMP clustering and inter-cell resource scheduling in heterogeneous ultra dense cellular networks [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2018, 67(3): 2741–2755. DOI: 10.1109/TVT.2017.2773640
- [4] GARCIA V, ZHOU Y Q, SHI J L. Coordinated multipoint transmission in dense cellular networks with user-centric adaptive clustering
 [J]. IEEE transactions on wireless communication, 2014, 13(8): 4297–4308. DOI: 10.1109/ TWC.2014.2316500
- [5] ZHOU Y Q, LIU H, PAN Z G, et al. Two-stage cooperative multicast transmission with optimized power consumption and guaranteed coverage [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2014, 32(2): 274–284. DOI: 10.1109/JSAC.2014.141208
- [6] ZHOU Y Q, WANG J Z, SAWAHASHI M. Downlink transmission of broadband OFCDM systems—Part I: hybrid detection [J]. IEEE transactions on communication, 2005, 53(4): 718–729. DOI: 10.1109/tcomm.2004.841961
- [7] 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. DOI: 10.12142/ZTETJ.201906007
- [8] GAO M L, AI B, NIU Y, et al. Edge caching and content delivery with minimized delay for both high-speed train and local users [C]// 2019 IEEE Global Communications Conference. Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/

GLOBECOM38437.2019.9013389

- [9] KANAI K, MUTO T, KATTO J, et al. Proactive content caching for mobile video utilizing transportation systems and evaluation through field experiments [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2016, 34(8): 2102– 2114. DOI: 10.1109/JSAC.2016.2577238
- [10] ZHOU Y Q, TIAN L, LIU L, et al. Fog computing enabled future mobile communication networks: a convergence of communication and computing [J]. IEEE communications magazine, 2019, 57(5): 20–27. DOI: 10.1109/ MCOM.2019.1800235
- [11] DUTTA L K, XIONG J, GUI L, et al. On hit rate improving and energy consumption minimizing in cache-based convergent overlay network on high-speed train [C]// 2019 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Jeju, Korea: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/ BMSB47279.2019.8971853
- [12] WU Y, FANG X M, YAN L. Performance analysis of on-board content caching and retrieval for high-speed railways [C]//2019 IEEE 2nd 5G World Forum. Dresden, Germany: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/5GWF.2019.8911642
- [13] LI B, XIONG J, LIU B, et al. Cache-based popular services pushing on high-speed train by using converged broadcasting and cellular networks [J]. IEEE transactions on broadcasting, 2019, 65(3): 577–588. DOI: 10.1109/ TBC.2018.2863102
- [14] JIANG Y X, FENG H J, ZHENG F C, et al. Deep learning-based edge caching in fog radio access networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2020, 19(12): 8442– 8454. DOI: 10.1109/TWC.2020.3022907
- [15] CHATZIELEFTHERIOU L E, KARALIOPOULOS M, KOUTSOPOULOS I. Jointly optimizing content caching and recommendations in small cell networks [J]. IEEE transactions on mobile computing, 2019, 18(1): 125–138. DOI: 10.1109/TMC.2018.2831690
- [16] SERMPEZIS P, GIANNAKAS T, SPYRO– POULOS T, et al. Soft cache hits: improving P14erformance through recommendation and delivery of related content [J]. IEEE jour– nal on selected areas in communications, 2018, 36(6): 1300–1313. DOI: 10.1109/ JSAC.2018.2844983
- [17] 王忠峰, 王富章, 孙华龙.高铁动车组 WiFi 运 营服务系统服务质量的测量与分析 [J]. 电子技 术应用, 2018, 44(5): 77–81. DOI: 10.16157/ j.issn.0258–7998.175166
- [18] MADDAH–ALI M A, NIESEN U. Fundamental limits of caching [J]. IEEE transactions on information theory, 2014, 60(5): 2856–2867. DOI: 10.1109/TIT.2014.2306938





潘振岗,北京紫光展锐 通信技术有限公司中央 研究院先进通信技术实 验室主任;主要研究方 向为无线信号处理、多 天线系统、信道编解码、 跨层优化。



用于超高移动性信道的 正交时频空调制

Orthogonal Time Frequency Space Modulation for Channels with Very High Mobility

> **刘梦晓/LIU Mengxiao,周晶/ZHOU Jing,张文逸/ZHANG Wenyi** (中国科学技术大学,中国 合肥 230026) (University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

摘要:分析了正交时频空(OTFS)调制的关键问题和研究进展,探讨了基于多载波体制的OTFS 与正交频分复用(OFDM)的关系,并在超高移动性信道中仿真比较了二者的性能。数值结果 表明,OTFS对信道时变引入的强多普勒效应展现了良好的稳健性,相比于OFDM能够更直接 地获取分集增益。因此,OTFS有望在支持超高移动性信道可靠通信方面发挥重要作用。

关键词:OTFS;延迟-多普勒信道;OFDM;超高移动性;分集增益

Abstract: The key issues and research progress of orthogonal time frequency space (OTFS) are introduced. The relationship between multicarrier-based OTFS and orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is analyzed, and their performances over very high mobility channels are compared via simulation. Numerical results demonstrate that the performance of OTFS under strong Doppler effects in time-varying channels is robust, and that the diversity gain can be obtained more directly than the OFDM. Therefore, OTFS has the potential of playing an important role in achieving reliable communications under very high mobility.

Keywords: OTFS; Delay–Doppler channel; OFDM; very high mobility; diversity gain

DOI:10.12142/ZTETJ.202104003 网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/ detail/34.1228.TN.20210722.1508.010.html

网络出版日期:2021-07-23 收稿日期:2021-06-23

新一代无线通信系统的愿景之一 是全方位支持不同类型的通信 场景和应用需求。其中,在高移动性 条件下保证通信质量是一个重要方 面。例如,国际电信联盟(ITU)的5G (IMT2020)愿景是支持500 km/h的超 高移动性^{III}。当前,中国高速铁路建 设发展迅猛,人们对旅行中不间断、 高质量通信的需求也在同步增长,这 也凸显出超高移动性可靠通信这一 课题的重要意义。

目前以第3代合作伙伴计划 (3GPP)为代表的主流无线通信系统 标准采用正交频分复用(OFDM)作为 基础波形,能够大幅度降低宽带信道 中通信发收机的实现复杂度,但在高 移动性的支持能力方面面临挑战。 超高移动性在时域上表现为信道响 应的快速时变,这对信道估计的实时 性、准确性以及导频开销控制等都造 成很大压力;超高移动性在频域上表 现为强多普勒效应,这导致OFDM系 统出现严重的子载波间干扰,采用传 统收发机体制很难应对。若简单地 通过缩短OFDM符号的绝对时间长 度来增强移动性支持,那么循环前缀 占比将相应增大,频谱效率严重 下降。

在上述背景下,近年来由R.HA-DANI等提出的一种称为"正交时频 空"(OTFS)^[2-3]的新型调制技术得到 了广泛关注。OTFS的主要思想是引 人延迟多普勒(Delay-Doppler)域信

基金项目:国家自然科学基金(61722114);中国博士 后科学基金(2019M662197)

道表示和信号调制方法,其通信过程 可归结为调制符号通过延迟-多普勒 域等效信道的过程。这一新思路的 优越性在于能够利用无线信道的一 种常见特征:即使时频域信道模型具 有高时变性,其延迟-多普勒域表示 通常仍是稀疏且慢变的。因此,在时 变衰落信道中使用 OTFS, 有可能较 好地控制信道估计开销和接收算法 复杂度。进一步地,由于在OTFS调 制过程中,每一个调制符号都经过了 扩展,占据了一帧 OTFS 信号对应的 全部时频资源,因此OTFS具有获取 信道全分集增益的潜力。OTFS可通 过在 OFDM 系统中加入预处理和后 处理来实现,因此具备与主流无线通 信标准的兼容性[2]。OTFS已成为近 年来无线通信物理层的代表性新技 术之一,受到业界的广泛关注。

本文旨在探讨基于多载波体制的OTFS技术在支持超高移动性可靠 通信方面的应用前景。为此,我们在 介绍OTFS基本原理的基础上,回顾 了近年来对OTFS的通信性能、设计、 信道估计等方面的研究进展,通过仿 真研究比较了OTFS与传统的OFDM 系统在超高移动性信道中的性能,说 明了OTFS有望在支持超高移动性信 道可靠通信方面发挥重要作用。

1 OTFS的基本原理与实现方法

对OTFS的原理可以从不同角度 进行描述和解释。本文选用在通信 领域最为人熟知的OTFS多载波解 释,并介绍对应的实现方法。如图1 所示,OTFS可视为在多载波传输基础上的一种二维扩展传输方案,可通过在OFDM系统的发、收端分别增加预处理、后处理来实现。图1中,辛有限傅里叶变换(SFFT)和辛有限傅里叶逆变换(ISFFT)^[3]都是针对矩阵的二维变换,它们都可通过两次一维的快速傅里叶变换/快速傅里叶逆变换(FFT/IFFT)来实现。因此,OTFS不需要改变现行主流通信系统标准的基本波形,也不需要大幅度增加信号处理复杂度,这为其在新一代无线通信系统中的应用扫清了基本障碍。

OTFS的理论建立在时变无线信 道的延迟-多普勒域表示的基础上。 一个时变无线信道的复基带等效输 入-输出关系由式(1)给出:

$$\begin{split} r(t) &= \int h(\tau,\nu) s(t-\tau) e^{i 2\pi \nu (t-\tau)} d\tau d\nu + \\ w(t), \end{split} \tag{1}$$

其中,*s*(*t*)和*r*(*t*)分别为发送和接收信 号波形,*w*(*t*)为加性高斯白噪声。信 道的延迟-多普勒域响应通常可表示 为式(2):

$$h(\tau,\nu) = \sum_{i=1}^{p} h_i \delta(\tau - \tau_i) \delta(\nu - \nu_i),$$
(2)

其中,P是传播路径数, h_i 、 τ_i 、 ν_i 分别 表示其中第i条路径的复值增益、延 迟和多普勒频移, $\delta(\cdot)$ 是 Dirac-delta 函数。我们假设信道中的有效反射 径较少,因此P的数值较小;同时,假 设该信道响应在通信最大时延的尺 度上是准静态的。在5G等大带宽、 高频段通信系统中,以上的延迟-多 普勒域信道稀疏性和慢变性假设是 广泛成立的^[2-4]。那么,与传统的通过 在时频域放置梳状导频等方法对时 变信道进行实时估计相比,在延迟-多普勒域进行信道估计所需的参数 数量和估计次数都少得多,也就有可 能大幅度减少信道估计的开销。

在 OTFS 发送端, 调制符号矩阵 $\{x[k,l], k = 0, \dots, N - 1, l = 0, \dots, M - 1\}$ 首先经 ISFFT 后得到矩阵 $\{X[n,m],$ $n = 0, \dots, N - 1, m = 0, \dots, M - 1$; iff 过多载波调制, $\{X[n,m]\}$ 将占据M 个子载波、N个多载波符号所对应的 时频格点。根据时变信道的延迟-多 普勒域表示理论,上述实现方法使得 调制符号矩阵 $\{x[k,l]\}$ 中的 $M \times N$ 个 元素与延迟-多普勒平面上的M×N 个格点一一对应,在延迟方向占据了 M个格点,多普勒方向占据了N个格 点。因此,通过 ISFFT 实现的是对调 制符号的二维扩展:每一个延迟-多 ·普勒域符号x[k,l]都被扩展到了二维 时频平面上。这使得OTFS具有直接 获取信道时频域全部分集增益的 潜力。

为简要说明 OTFS 的延迟-多普 勒域等效信道模型,我们假设信道各 路径的延迟 τ_i 和多普勒频移 ν_i 都分 布在延迟-多普勒平面上的格点上, 并暂时略去信道噪声。那么,经过 SFFT 后获得的接收序列y[k,l]与输 入序列x[k,l]的关系由延迟-多普勒 域信道响应 $h(\tau,\nu)$ 决定,可表示为式 (3)中的二维循环卷积形式^[5]:



 $y[k,l] = \sum_{i=1}^{P} h_i e^{-j2\pi\nu_i \tau_i} x \left[\left[k - k_{\nu_i} \right]_N, \left[l - l_{\tau_i} \right]_M \right],$

(3)

其中,[·]_N表示模N运算,*l*_{xi}和*k*_w分别 反映出由第*i*条路径导致的符号 *x*[*k*,*l*]的分量在延迟和多普勒域格点 阵列中的移位。尽管信道是时变的, 但延迟-多普勒域等效信道模型是时 不变的,且对各个符号具有相同的形 式。另外,信道对不同符号的增益基 本相同,这样就避免了符号被时频域 选择性衰落直接影响。

2 OTFS的关键问题与研究进展

2.1 OTFS的滤波器设计与加窗问题

在实际信道中,物理路径通常不 会准确对应延迟-多普勒平面上的格 点,而成形滤波器、接收滤波器的影 响也会反映到等效信道中。这些都 导致 OTFS 延迟-多普勒域等效信道 具有比公式(3)更加复杂的形式(尽 管其时不变特性仍然保持),而掌握 等效信道模型是在接收端实现 OTFS 信号检测的前提。

在OTFS的一般理论中,假设发、 收滤波器满足双正交特性,即能够在 时变多径信道中消除时频域的符号 间干扰,同时满足无线通信所需的带 限特性。然而,理论已经证明严格满 足这一特性的理想滤波器并不存在。 例如,基于 OFDM 的 OTFS 系统,在时 变信道中不能完全保持{X[n,m]}到 ${Y[n,m]}$ 的一一对应关系。实际中 需要设计近似满足双正交性且具有 带限特性的滤波器波形,并在接收端 尽可能消除滤波器非理想特性的影 响。文献[5-6]推导了使用矩形脉冲 和任意脉冲成形滤波的OTFS等效信 道模型,分析了非理想滤波器引入的 符号间干扰和消除方法,指出 OTFS 的滤波器设计需要考虑性能和带限 特性之间的折中关系。

对时频域信号{X[n,m]}进行加 窗处理能够对等效信道进行一定的 优化,从而改善某些方面的性能。文 献[7]指出,具有较低旁瓣的窗能够增 进等效信道稀疏度,例如与传统的矩 形或正弦窗相比,Dolph-Chebyshev 窗可显著提高信道估计和数据检测 的性能。

2.2 OTFS的信道估计与信号检测

在围绕 OTFS 展开的各方面研究 中,信道估计是非常重要的课题。 OTFS的一大优越性是,通过在延迟-多普勒域描述时频双色散信道,有可 能大幅度降低信道估计的开销和复 杂度。这一特性已经在若干研究中 得到验证。例如,文献[8]考虑了导频 与数据同传的设计方案,在延迟-多 普勒域格点上设计了导频图样,通过 保护间隔避免导频和数据符号之间 的干扰,通过优化阈值检测信道有效 路径并估计其强度,并利用估计结果 检测信号。仿真结果表明,这一设计 所能达到的性能与完全已知信道条 件下的性能接近。在多天线系统中, OTFS 的信道估计问题更具挑战性。 近期已有研究者考虑大规模多输入 多输出(Massive MIMO)OTFS系统的 信道估计问题。例如,考虑分数阶多 普勒频偏的影响,文献[9]提出了能够 达到良好性能的导频设计和信道估 计算法;文献[10]论证了 OTFS MIMO 信道的稀疏性,将下行多天线信道估 计问题归结为稀疏信号重建问题,并 提出了基于三维正交匹配追踪的信 道估计算法,能够以较低的开销实现 足够精确的信道估计。

在接收端得到对 OTFS 等效信道 的估计后,即可实现信号的检测。由 于延迟-多普勒域等效信道通常能够

保持一定的稀疏性,适合应用经典的 消息传递(MP)算法。文献[5]分析了 OTFS等效信道的因子图模型,设计 了能够同时处理非理想脉冲波形导 致的时频域符号干扰以及多普勒域 符号干扰的 MP 算法, 通过仿真证明 其能够在高移动性信道中实现良好 的性能;所提出的MP检测器算法的 复杂度仅随M和N线性增长,远低于 ML检测的复杂度,具备用于实际系 统的可能。但由于OTFS在多径环境 下的等效因子图常具有短环结构, MP算法很容易陷入局部最优。文献 [11]提出了一种变分贝叶斯迭代检测 器,能够避免上述问题,保证算法收 敛到近最大后验概率检测器的性能。

2.3 OTFS 性能分析:分集增益与 编码

OTFS通过将每一个调制符号扩 展到时频二维,获取频率分集增益和 时间分集增益,这与OFDM相比具有 明显优势。但获取信道全分集增益 仍需要一定的前提,包括信道编码和 检测算法的恰当设计。文献[12]分析 了 OTFS 系统的成对差错概率,指出 在未编码情况下,其严格意义上的分 集阶数仍然为1。也就是说,在信噪 比足够大时,每增加10dB的信噪比, OTFS 的错误概率仅会下降一个量 级。但对于实际的信噪比、错误概率 范围和不太小的 M 和 N 数值, 这样的 效果并不会明显出现,文献[13]将这 一特征描述为OTFS具有大于1的"有 效分集增益"。

对编码OTFS系统分集增益的分 析更具实际意义。最近,文献[14]研 究了在OTFS中获取分集增益的编码 设计准则,指出了在OTFS系统中编 码增益和分集增益存在折中关系:分 集增益随着信道可分辨多径的数量 而增加,但编码增益随之减少。数值 结果证明,经过恰当设计的编码OT-FS系统在高移动性信道中能够确保 获取全分集增益,而未编码OTFS系统并不具有这一特性。

2.4 OTFS用于实际无线信道

对OTFS的理论研究一般包含对 时变无线信道特性的一些理想化假 设,因此研究实际信道中OTFS的实 现与性能具有重要意义,这方面的研 究目前相对比较少。文献[15]在实测 得到的毫米波车载通信信道中研究 了OTFS的性能,结果表明兼顾OTFS 接收机复杂度与获取分集增益并不 容易,进一步优化性能需要合理选择 系统参数并应用信道编码。文献[16] 研究了OTFS的软件无线电实现方 法,在实际的室内无线环境中研究了 接收机直流偏移与载波频偏的影响, 验证了该场景中OTFS相对OFDM的 性能优势。

3 OTFS 在超高移动性信道中的 性能研究

在本节中,我们通过仿真对比不

同移动速度条件下 OTFS 和 OFDM 的 误码率(BER)。仿真中,我们假设 OTFS 的发收滤波器具有理想双正交 的一些特性,并假设理想信道估计。 输入符号x[k,l]的调制方式采用四元 正交幅度调制(4 QAM)。设载波频 率为4 GHz,信道采用3GPP 扩展车载 A(EVA)模型^[5],路径数为P = 4,各径 幅度增益的统计特性相同。在移动 性方面,我们考虑了最高500 km/h 的 移动速度所导致的等效多普勒频移, 体现了信道的超高移动性。

在图 2(a)中,我们比较了 OTFS 与 OFDM 的 BER 性能,其中 OFDM 沿 用了传统的逐符号最小欧氏距离检 测器,它在无多普勒频移的信道中是 最大似然检测器;OTFS 则使用了 MP 检测器。可见,对于 OFDM,随着移动 性的增加,子载波间干扰相应增大, 导致 BER 性能迅速出现错误平层。 可以推断,即使借助纠错码进一步降 低错误概率,也无法避免信噪比的损 失。而对 OTFS,仿真结果表明其性 能对多普勒效应表现出良好的稳健 性,这验证了其对超高移动性具有很 强的支持能力。对比二者的性能,可见OTFS总能够获取更大的分集增益,而未编码OFDM系统的分集阶数为1。因此,对于一定的未编码BER,OTFS相对于OFDM具有可观的信噪比增益。

然而,OTFS的优越性与不同的 比较标准和具体的系统参数设置有 关。在图2(b)中,我们比较了OFDM 与 OTFS 在均采用 MP 检测器时的 BER性能,并改变了一些系统参数。 仿真结果表明,对于 OFDM, MP 检测 器能够在一定程度上对抗超高移动 性导致的子载波间干扰的影响,其性 能甚至超过了无多普勒效应时最大 似然检测器所达到的性能,且表现出 一定的分集增益。对此,一种合理的 解释是该增益源于多普勒效应导致 的符号在频域的扩展。相反,在系统 参数有所改变后,OTFS的性能相对 图 2(a)略微变差,因此在图 2(b)中相 对OFDM的性能增益也就相应地减 小了。如果使用了设计恰当的信道 编码,那么OFDM系统所能获取的分 集增益还将增加,从而使二者的性能



▲图2 OTFS与OFDM系统在超高移动性信道中的性能对比

差异进一步减小。因此,在不同条件下,OTFS的性能优越性还需要更为 全面的评估,特别是需要考虑编码系 统的性能。这方面的最新进展可参 见文献[14]。

4 结束语

新一代无线通信系统的基本波 形需要灵活适配不同的通信场景。 OTFS能够直接而显著地增强现有的 OFDM等多载波波形体制对高移动性 场景的支持能力,对全面支持高速铁 路等场景、满足当前迅猛发展的通信 需求具有重要意义。在基本波形的 未来演进中,OTFS也有望持续发挥 作用,例如有研究指出OTFS也可纳 入广义频分复用(GFDM)这一新型波 形体制的框架中实现¹¹⁷。

但 OTFS 走向应用仍然存在很多 不可忽视的问题,特别是需要进一步 考虑各种非理想制约因素的影响,从 而明确 OTFS 的实际增益,避免片面 夸大其作用。这些制约因素包括实 际信道特性及其估计、成形滤波、编 码、接收机复杂度乃至容许时延等方 面。目前业界对 OTFS 的最终性能极 限的研究仍然不够,这需要从第一性 原理^[18]出发,理解其性能增益的本质 和关键影响因素。

致谢

感谢澳大利亚新南威尔士大学 李双洋博士在文章撰写过程中给予 的大力支持和帮助!

参考文献

- [1] IMT-2020(5G)推进组.5G 愿景与需求白皮书 [R].2014
- [2] MONK A, HADANI R, TSATSSANIS M, et al.

OTFS-orthogonal time frequency space: a novel modulation technique meeting 5G high mobility and massive MIMO challenges [EB/ OL]. (2016-08-09)[2021-06-10]. https://arx-iv.org/abs/1608.02993

- [3] HADANI R, RAKIB S, TSATSANIS M, et al. Orthogonal time frequency space modulation [C]//2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2017: 1–6. DOI: 10.1109/WCNC.2017.7925924
- [4] HE R S, SCHNEIDER C, AI B, et al. Propagation channels of 5G millimeter-wave vehicleto-vehicle communications: recent advances and future challenges [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2020, 15(1): 16–26. DOI:10.1109/MVT.2019.2928898
- [5] RAVITEJA P, PHAN K T, HONG Y, et al. Interference cancellation and iterative detection for orthogonal time frequency space modulation [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2018, 17(10): 6501–6515. DOI: 10.1109/TWC.2018.2860011
- [6] RAVITEJA P, HONG Y, VITERBO E, et al. Practical pulse-shaping waveforms for reduced-cyclic-prefix OTFS [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2019, 68(1): 957-961. DOI:10.1109/TVT.2018.2878891
- [7] WEI Z Q, YUAN W J, LI S Y, et al. Transmitter and receiver window designs for orthogonal time– frequency space modulation [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(4): 2207–2223. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3051386
- [8] RAVITEJA P, PHAN K T, HONG Y. Embedded pilot-aided channel estimation for OTFS in delay-Doppler channels [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2019, 68(5): 4906– 4917. DOI:10.1109/TVT.2019.2906357
- [9] SHI D, WANG W J, YOU L, et al. Deterministic pilot design and channel estimation for downlink massive MIMO-OTFS systems in presence of the fractional Doppler [EB/OL]. (2021-05-21) [2021-06-11]. http://arxiv.org/ abs/2015.09628v1
- [10] SHEN W Q, DAI L L, AN J P, et al. Channel estimation for orthogonal time frequency space (OTFS) massive MIMO [J]. IEEE transactions on signal processing, 2019, 67(16): 4204–4217. DOI:10.1109/TSP.2019.2919411
- [11] YUAN W J, Wei Z Q, YUAN J H, et al. A simple variational Bayes detector for orthogonal time frequency space (OTFS) modulation [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2020, 69(7): 7976–7980. DOI: 10.1109/TVT.2020.2991443
- [12] SURABHI G D, AUGUSTINE R M, CHOCKA-LINGAM A. On the diversity of uncoded OT-FS modulation in doubly-dispersive channels [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2019, 18(6): 3049–3063. DOI: 10.1109/TWC.2019.2909205
- [13] RAVITEJA P, HONG Y, VITERBO E, et al. Effective diversity of OTFS modulation [J]. IEEE wireless communications letters, 2020, 9(2): 249–253. DOI: 10.1109/ LWC.2019.2951758
- [14] LI S Y, YUAN J H, YUAN W J, et al. Performance analysis of coded OTFS systems over high-mobility channels [EB/OL]. (2021– 04–14) [2021–06–12]. http://ieeexplore.ieee.

org/document/9404861

- [15] BLAZEK T, RADOVIC D. Performance evaluation of OTFS over measured V2V channels at 60 GHz [C]//2020 IEEE MTT–S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM). Linz, Austria: IEEE, 2020: 1–4. DOI: 10.1109/ICMIM48759.2020.9298994
- [16] THAJ T, VITERBO E. OTFS modem SDR implementation and experimental study of receiver impairment effects [C]//2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Shanghai, China: IEEE, 2019: 1–6. DOI: 10.1109/IC– CW.2019.8757167
- [17] NIMR A, CHAFII M, MATTHE M, et al. Extended GFDM framework: OTFS and GFDM comparison [C]//2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Abu Dhabi, United Arab Emirates: IEEE, 2018: 1– 6. DOI:10.1109/GLOCOM.2018.8647704
- [18] MOHAMMED S K. Derivation of OTFS modulation from first principles [EB/OL]. (2021– 03–1) [2021–06–11]. http://ieeexplore.ieee. org/document/9392379



智能反射面在高铁通信下的 应用研究



Applications of Intelligent Reflecting Surface in High-Speed Railway Communications

王靖瑜/WANG Jingyu,鞠宏浩/JU Honghao,方旭明/FANG Xuming (西南交通大学,中国 成都 611756) (Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

摘要:提出了一种智能反射面(IRS)辅助的高铁通信方案。针对视距(LOS)主导的无线通信场景,在车载接入点(AP)和基站(BS)已知信道状态情况下,本方案首先通过调整IRS反射信号相位,补偿级联信道中LOS分量的多普勒频移,后通过最大化LOS径波束赋形增益,并在接收端处将IRS反射信号与基站发射信号相干叠加,提升接收信号质量。仿真结果表明,相比于未部署IRS场景,IRS辅助的高铁无线通信系统有效减轻了高铁高速移动对无线信道带来的快衰落影响,并且系统误比特率性能也得到了明显改善。

关键词:高速铁路;智能反射面;快衰落;波束赋形

Abstract: An Intelligent Reflecting Surface (IRS) –assisted high–speed railway communica– tions scheme is proposed. For the Line–Of–Sight (LOS) dominant communication scenario, assuming the channel state information is perfectly known by the access point (AP) and base station (BS), the proposed scheme can control the IRS reflecting phase to compensate for the Doppler shift of the LOS component, maximize the beamforming gain of the LOS path, and achieve the coherent combination of the IRS reflected signal and BS transmitted signal. Simulation results show that the IRS–assisted high–speed railway communications system can effectively alleviate the fast fading and improve system Bit Error Rate.

Keywords: high-speed railway; Intelligent Reflecting Surface; fast fading; beamforming

DOI:10.12142/ZTETJ.202104004 网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/ detail/34.1228.TN.20210722.1415.004.html

网络出版日期:2021-07-23 收稿日期:2021-06-18

 传统的地面交通工具,高铁具有很高的运行速度,这将在信号收发端产生较大的多普勒频偏¹¹¹,严重时可能还 会导致接收端无法解调信号,这给高铁车地通信系统的设计带来了极大挑战。

近年兴起的智能反射面(IRS)具 备重塑信道环境的能力^[2]。IRS可以 控制每个反射单元的幅度和相移,并 根据信道状态动态调整反射信号^[3]。 利用这一特点,IRS能够实时补偿多 普勒频移的相位变化,从而减少多普 勒频移对接收端的影响^[45]。若将其 运用到高铁车地通信系统设计中,有 望解决高铁高速移动过程中的信道 快衰落问题。

1 IRS 辅助的高铁车地通信系统

在高铁通信中,为了避免电磁波 穿透高铁车厢的穿透损耗,车内用户 和地面基站一般采用基站(BS)与车 载接入点(AP)通信、车载 AP与车内

基金项目:国家自然科学基金(62071393、U1834210); 四川省应用基础研究重点项目(2020YJ0218);中央高 校基本科研业务费项目(2682021CF019)

用户通信的两跳链路。由于中国高 铁线路主要以开阔环境为主,铁路周 围反射和散射较少,存在较强视距 (LOS)径^[6]。因此,本文中我们主要在 LOS 径主导的高速移动场景下,研究 IRS 辅助的高铁无线通信性能提升 方法。

为阐述IRS消除多普勒频移的原理,我们假设在高铁视距通信场景下,LOS径受到障碍物遮挡,AP只能接收IRS反射信号。针对等效基带信号,如果不考虑噪声及信道衰落,IRS接收到的基带信号为:

$$y(t) = x(t)e^{j2\pi f_D t},\tag{1}$$

其中, f_D是BS-IRS链路的多普勒频移。通过IRS反射后,接收信号可表示为:

$$y(t) = x(t)e^{j2\pi f_D t + j\theta(t)},$$
(2)

其中, $e^{i\theta(t)}$ 表示IRS随时间变化的相移 函数。显然,令 $\theta(t) = -2\pi f_{D}t$ (即在每 一时刻利用IRS消除多普勒频移引入 的相位变化),就可以消除多普勒频 移,提升高速移动场景下的接收端 性能。

2系统模型建立及求解

通过以上分析,我们可以利用 IRS来提升高铁快速移动时的通信接 收性能。如图1所示,首先利用IRS 建立级联链路,在IRS处分离出LOS 分量和非视距(NLOS)分量。其中, LOS分量和NLOS分量分别受多普勒 频移和多普勒扩展影响。然后利用 IRS调整LOS分量反射信号相位,在 消除LOS分量多普勒频移的同时,通 过波束赋形提高LOS径增益。最后, 在 AP 侧将 IRS 反射信号与基站发射 信号相干叠加,整体上提升接收端信 噪比并减少信道快衰落影响。

2.1 IRS辅助下的高铁通信模型

为了更好地评估 IRS 给高铁通信 带来的性能提升,我们假设所有信道 状态信息(CSI)完全已知。设定列车 以速度v匀速行驶,基站和车载 AP均 为全向单天线。IRS 为布置在铁路一 侧的均匀矩形阵列(URA), 由 $N_I =$ $N \times N$ 个天线阵元组成。以BS 为原 点建立三维笛卡尔坐标系,假设帧长 为 T_d ,每一帧由M个长度为 T_c 的时隙 组成,则满足 $T_d = M \times T_c$ 。

我们考虑两种链路:BS-AP链路 (直接链路)和BS-IRS-AP链路(级联 链路)。直接链路在第n个时隙的信 道增益 $h_{d,n}$ 服从瑞利分布,其多普勒 功率扩展谱为Jakes谱。级联链路包 含 BS-IRS 链路和 IRS-AP 链路,BS-IRS 链路的信道增益为 $h_1 \in \mathbb{C}^{N_l \times 1}$, IRS-AP 链路的信道增益为 $h_1 \in \mathbb{C}^{N_l \times 1}$, IRS-AP 链路的信道增益为 $h_1 \in \mathbb{C}^{N_l \times 1}$, IRS-AP 链路的信道增益为 $h_2 \in \mathbb{C}^{1 \times N_l}$ 。对于BS-IRS链路,由于 IRS 的位置已提前规划,假设该链路 为LOS传输,则信道 h_1 建模为:

$$h_{1} = \alpha p_{x}(\varphi_{1}, \theta_{1}) \otimes p_{z}(\varphi_{1}, \theta_{1}) =$$

$$\alpha a(\varphi_{1}, \theta_{1}), \qquad (3)$$

其中,α表示BS-IRS链路的路径复增

益, $\varphi_1 \in [0,\pi]$ 和 $\theta_1 \in [0,\pi]$ 分别表示 信号到达IRS的方位角以及俯仰角, ⊗ 表示克罗内克积(Kronecker Product) 。 $p_x(\varphi_1, \theta_1) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 与 $p_z(\varphi_1, \theta_1) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 分别为IRS沿x轴和 z轴的导向矢量^[7]:

$$p_{x}\left(\varphi_{1},\theta_{1}\right) = \left[1,e^{j2\pi d_{x}\sin\theta_{1}\cos\varphi_{1}/\lambda},\cdots,e^{j(N-1)2\pi d_{x}\sin\theta_{1}\cos\varphi_{1}/\lambda}\right]^{T},$$

$$(4)$$

$$p_{z}(\varphi_{1},\theta_{1}) = \left[1, e^{j2\pi d_{z}\cos\theta_{1}/\lambda}, \cdots, e^{j(N-1)2\pi d_{z}\cos\theta_{1}/\lambda}\right]^{T}$$
(5)

由于BS-IRS链路保持相对静止, 那么在一个帧长内,可认为 α 、 θ_1 和 φ_1 保持不变。针对IRS-AP链路,第n个 时隙下的信道增益 $h_{2,n}$ 建模成莱斯 信道:

$$\boldsymbol{h}_{2,n} = \sqrt{\frac{\kappa}{1+\kappa}} \boldsymbol{h}_{\text{LOS},n} + \sqrt{\frac{1}{1+\kappa}} \boldsymbol{h}_{\text{NLOS},n}, n = 1, 2, \cdots, M, \qquad (6)$$

其中, κ 为莱斯因子, $h_{NLOS,n}$ 为第n 个



▲图1 IRS 辅助下的高铁通信

王靖瑜 等

智能反射面在高铁通信下的应用研究 ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

时隙 IRS-AP 链路中 NLOS 分量,服从 瑞利分布,其功率扩展谱为 Jakes 谱。 $h_{10S,n}$ 为 LOS 分量,仅受多普勒频偏影 响。 $h_{10S,n}$ 为:

$$\boldsymbol{h}_{\text{LOS},n} = \beta \boldsymbol{p}_{x} (\varphi_{2}, \theta_{2}) \otimes \boldsymbol{p}_{z} (\varphi_{2}, \theta_{2}) e^{j2\pi f_{a}nT_{c}} = \beta \boldsymbol{a} (\varphi_{2}, \theta_{2}) e^{j2\pi f_{a}nT_{c}}, n = 1, 2, \cdots, M_{o}$$
(7)

β表示 IRS-AP链路的路径复增 益, $\varphi_2 \in [0, \pi]$ 和 $\theta_2 \in [0, \pi]$ 分别表示 信号离开 IRS 的方位角和俯仰角。相 对于列车运行速度,由于通信帧长较 短(毫秒级),在一个帧长内可认为列 车相对于 BS 保持静止,信道复增益 系数变化较为缓慢^[8]。因此,假设β、 θ_2, φ_2 和 f_4 在一个帧内保持不变。

在前文所述基础上,定义对角矩 阵 $\Omega_n = \text{diag}(e^{j\omega_{1,n}}, \dots, e^{j\omega_{N,n}}) \in \mathbb{C}^{N_l \times N_l}$ 为 第n个时隙下IRS反射系数矩阵,则 第n个时隙接收信号可以写为:

$$y = (\boldsymbol{h}_{2,n}^{T} \boldsymbol{\Omega}_{n} \boldsymbol{h}_{1} + \boldsymbol{h}_{d,n}) x + \boldsymbol{\xi}_{n},$$

$$n = 1, 2, \cdots, M,$$
(8)

其中, $\xi_n \sim CN(0,\sigma^2)$ 表示加性高斯白噪声。

2.2 问题求解

针对上述问题,可以通过以下步 骤减少信道快衰落影响,并提升AP 接收信号的信噪比:

(1)利用 IRS 消除 LOS 分量的多 普勒频移,并进行波束赋形,以提高 LOS 径增益;

(2)在(1)的基础上,利用 IRS 调整反射信号相位,使 AP 接收到的 IRS 反射信号与基站发射信号相干叠加, 最大化 AP 接收信号的信噪比。

首先针对公式(8)中的接收信号 y_k ,为利用IRS对抗多普勒偏移并实 现信号波束赋形,定义 $h_{r,a} = h_{2,a}^T \Omega_n h_1$ 为级联信道,那么 $h_{r,a}$ 可进一步写为:

$$h_{r,n} = \sqrt{\frac{\kappa}{1+\kappa}} h_{\text{LOS},n}^T \Omega_n h_1 + \sqrt{\frac{1}{1+\kappa}} h_{\text{NLOS},n}^T \Omega_n h_1 = \sqrt{\frac{\kappa}{1+\kappa}} s_{\text{LOS},n} + \sqrt{\frac{1}{1+\kappa}} s_{\text{NLOS},n}, n = 1, 2, \cdots, M_o$$
(9)

此外,定义 $\boldsymbol{v}_{n} = \left[e^{j\omega_{1n}}, \dots, e^{j\omega_{Nn}}\right]^{T}$, LOS分量 $\boldsymbol{s}_{\text{LOS},n}$ 经过变量代换可以得 到 $\boldsymbol{h}_{\text{LOS},n}^{T} \boldsymbol{\Omega}_{n} \boldsymbol{h}_{1} = \boldsymbol{v}_{n}^{T} \boldsymbol{g}_{n} \circ \boldsymbol{g}_{n}$ 表示为:

$$g_{n} = \gamma e^{j2\pi f_{d}nT_{c}} a(\varphi_{1},\theta_{1}) \odot a(\varphi_{2},\theta_{2}),$$

$$n = 1,2,\cdots,M, \qquad (10)$$

其中,⊙为哈达玛积(Hadamard Product)。基于此,*s*_{LOS,n}可进一步表示为:

$$s_{\text{LOS},n} = \gamma e^{j2\pi f_a n T_c} \boldsymbol{v}_n^T \boldsymbol{a} \left(\boldsymbol{\varphi}_1, \boldsymbol{\theta}_1 \right) \odot \boldsymbol{a} \left(\boldsymbol{\varphi}_2, \boldsymbol{\theta}_2 \right),$$

$$n = 1, 2, \cdots, M_{\circ}$$
(11)

根据公式(11),在第*n*个时隙将 IRS 相 位 调 整 为 $\boldsymbol{v}_{1,n}^{T} = e^{-j2\pi f_{a}nT_{c}} \left(\boldsymbol{a} \left(\varphi_{1}, \theta_{1} \right) \odot \boldsymbol{a} \left(\varphi_{2}, \theta_{2} \right) \right)^{H}$,这样能 够消除 $\boldsymbol{h}_{\text{LOS},n}$ 中引入的多普勒频移,并 实现 IRS 波束赋形,提高级联信道中 LOS 径增益。IRS 波束赋形后,在 AP 侧,级联信道中 LOS 径增益较大,在 各信道中占据主导地位。这使得等 效合成信道的快衰落影响得到改善。

经过第1步求解,级联信道表示 为 *h*⁽¹⁾_{rn}。BS 和 AP 之间的等效信道模 型可写为:

$$h_n = h_{r,n}^{(1)} + h_{d,n}, n = 1, 2, \cdots, M_{\circ}$$
(12)

由于向波束赋形矢量添加任意 相位旋转并不会影响波束赋形增益, 我们定义 $v_{2,n} = v_{1,n}e^{i\epsilon}$ 为第2步求解的 调整相位。将 $v_{2,n}$ 代入公式(12)得到 公式(13):

$$h_{n} = h_{r,n}^{(2)} + h_{d,n} = h_{r,n}^{(1)} e^{j\varepsilon} + h_{d,n},$$

$$n = 1, 2, \cdots, M_{\circ}$$
(13)

根据公式(13)可知,在第n个时 隙下将 IRS 相位调整为 $v_{2,n} =$ $v_{1,n}e^{-j(\arg(h_{n}^{(1)}) - \arg(h_d))}$,能够在消除多普勒 频移以及实现级联信道波束赋形的 基础上,使AP接收到的IRS反射信号 与BS发射信号相干叠加,从而整体 上提升AP接收信噪比。

在第n个时隙下, IRS 调整为最 优相位 \boldsymbol{v}_{2n} 后,可达速率为:

$$R = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^{M} \log \left(1 + \frac{\left| \widehat{h_n} \right|^2}{\Gamma \sigma^2} \right)_{\circ}$$
(14)

其中, $\hat{h_n} = h_{rn}^{(2)} + h_{dn} 为第n个时隙下$ IRS调整为最优相位后的最大信道增 $益,<math>\Gamma \ge 1$ 表示与实际情况下信道容 量差距,由所用调制和编码机制 (MCS)决定。

3 仿真结果及分析

本节中,我们通过仿真来验证所 提算法的性能。仿真参数的设置如 表1所示。经计算,最大多普勒频移 $f_m = vf_c/c \approx 1660 \text{ Hz},其中 c 为光速。$ $每个时隙长度设置为相关时间 <math>T_c = 0.423/f_m \approx 0.2 \text{ ms}$ 。

我们设置 BS、IRS 和 AP 的坐标分 别为(0 m, 0 m, 20 m)、(0 m, 300 m, 20 m)、(20 m, 200 m, 0 m)。为方便讨 论 , 假 设 IRS 布 阵 间 距 $d_x = d_y = 0.01$ m。根据远场边界公 式^[9],可得远场距离为 $L = 2D^2/$ $\lambda = 2N_I d_x d_y / \lambda \approx 5.3$ m。因此,我们可认 为收发端均位于远场,此时级联信道 满足路径乘积损耗模型^[10]。

假设IRS单元数 $N_1 = 40 \times 40$,图 2给出了一个传输帧内,信道增益随时间变化的曲线。由图2可知,在没 有部署IRS时,信道增益波动幅度大 且剧烈;而经过IRS智能反射后,信道 增益波动幅度小且更加平缓,并且平

专题

智能反射面在高铁通信下的应用研究

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

▼		
仿真参数	参数值	
	350 km/h	
载波频率f。	5 GHz	
带宽8	100 kHz	
噪声功率 σ^2	-90 dBm	
发射功率P,	40 dBm	
帧长 T_d	3 ms	
参考距离 $(1 m)$ 路径损耗 C_0	30 dB	
莱斯因子κ	10 dB	
BS-AP链路路损因子	3.5	
BS-IRS信道路损因子	2	
IRS-AP信道路损因子	2.8	
多普勒功率谱	Jakes	
AP:接入点 BS:基站 IRS:智能反射面		

均增益相比于未部署IRS时也有了明 显提升。这表明IRS减轻了速度对无 线信道时变性的影响。

主1 左古幺粉沉罕

在上述基础上,我们研究可达速 率*R*与单元数*N*,间关系。根据图3可 知,部署IRS后,IRS采用最优相位或 随机相位,可达速率均随*N*,增加而增 大。但采用最优相位后,可达速率*R* 具有更高的增长速率。

最后,固定BS坐标为(0m,0m, 20m), IRS坐标为(0m, 300m, 20m), 假设IRS单元数 N_1 = 40 × 40、BS发射 16进制正交幅度调制(QAM)信号,并 分析车载 AP分别运行至不同位置时 误比特率情况。从图4可以看出,没 有部署IRS时,由于不存在波束赋形 增益,接收信噪比相对较低,误比特 率相对较大。当IRS调整至最优相位 时,该方案充分利用了BS-AP以及BS-IRS-AP两条链路带来的分集增益,所 以误比特率相对较低。此外,当IRS 调整至最优相位时,随着列车远离BS 并逐渐向 IRS 靠近,误比特率呈现出 先增后减的趋势。这是因为列车在 靠近BS时,AP到BS路径损耗较小, 接收信噪比较大,使得误比特率降 低;而列车靠近IRS时,AP接收到的 BS信号较弱,但由于AP更靠近IRS, 因此能够接收到较强的IRS反射信 号。这使得接收信禄 收信,误称了一个较高值,误比你。 当例是一个较高值,误比你。 当例是一个较少。 当问题是(同时)。 (RS)时,AP端的接收低,误比特率相对较大。

4 结束语









基于5G-R业务的 高速铁路异构网络接入技术

Heterogeneous Network Access Technologies Based on 5G-R Services for High-Speed Railway

李翠然/LI Cuiran,谢健骊/XIE Jianli,高文娟/GAO Wenjuan (兰州交通大学,中国 兰州 730070) (Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

摘要:铁路窄带移动通信系统(GSM-R)正在向铁路宽带移动通信系统(LTE-R)、基于5G的铁路移动通信系统(5G-R)演进。针对未来高铁通信中的实时视频监控、车-车(T2T)通信、列车多媒体调度等5G-R业务的异构无线网络接入,提出一种基于马尔可夫决策过程(MDP)模型的网络接入算法。根据不同类型业务的服务质量(QoS)属性和无线网络的时变特性构建网络回报函数,并基于模糊层次聚类理论来计算QoS属性的权重值。采用人工智能算法对MDP模型进行求解,使用户以较少的切换次数接入长期期望回报值最大的网络,并仿真分析算法的收敛性和有效性。

关键词:高速铁路;5G-R;异构网络;马尔可夫决策过程;人工智能

Abstract: Global system for mobile communications-railway (GSM-R) is evolving to broadband mobile communication systems-R (LTE-R) and 5G for railways (5G-R). A radio access algorithm in wireless heterogeneous environment based on Markov decision process (MDP) decision model is proposed to meet the needs of 5G-R services access to different networks in future high-speed railway communications, such as video surveillance, trainto-train (T2T) direct communication, and train multimedia dispatching. According to the quality of service (QoS) attributes of different types of services and time-varying characteristics of wireless networks, the network reward function is constructed, and the QoS attribute weight is determined based on fuzzy clustering theory. The MDP decision model is solved by an artificial intelligence algorithm, which enables users to access the network with the maximum long-term reward with fewer handoffs. In addition, the convergence and effectiveness of the algorithm are analyzed by simulation.

Keywords: high-speed railway; 5G-R; heterogeneous network; Markov decision process; artificial intelligence

关于铁正在全球广泛部署,受到学术界和工业界的极大关注。欧洲"Shift2Rail计划"一直致力于铁路的发展^[1]。铁路基础设施、列车、旅客和货物在未来将会更加互联互通,并

基金项目:国家自然科学基金(61661025、61661026)

为旅客提供更为舒适和安全的服务。 2019年世界无线电通信大会(WRC-19)和电气与电子工程师协会(IEEE) 发布一系列支持智能铁路发展的通 信标准。为迎接2022年北京冬季奥 运会,中国已建成一条北京至张家 口、时速为350 km/h 的智能高铁

线路。

高铁的智能化对铁路移动通信 系统的发展提出新的要求。目前,铁 路窄带移动通信系统(GSM-R)已在 中国青藏线、大秦线、胶济线等得到 应用^[2]。然而,GSM-R毕竟是一种窄 带系统,不能完全满足铁路行业的要

detail/34.1228.TN.20210722.1439.008.html

网络出版日期:2021-07-22 收稿日期:2021-06-28

DOI: 10.12142/ZTETJ.202104005

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/



求^[3]。铁路移动通信系统需要跟上 4G和5G通信技术发展的步伐。相比 于GSM-R,铁路宽带移动通信系统 (LTE-R)和基于5G的铁路移动通信 系统(5G-R)可以提供更多样化的服 务。未来的铁路移动通信系统将拥 有异构化的网络架构^[1,3]。

在异构铁路无线网络环境中,支 持智能铁路发展的高数据速率业务 有很多,包括车-车通信(T2T)、列车 多媒体调度、实时4K/8K超高清 (UHD)视频传输、实时视频监控、列 车远程维护、车站内高速数据的无线 下载等。这就需要一种能够基于业 务服务质量(QoS)参数的灵活、有效 的异构网络选择算法,使不同类型的 业务接入最佳无线网络中。

1 铁 路 专 用 移 动 通 信 系 统 的 演进

随着高铁的广泛部署和列车的 提速,及时、可靠、高速地传输列车控 制信号和高铁乘客信息变得至关重 要。铁路移动通信系统正在从GSM-R向LTE-R、5G-R演进。

(1) GSM-R

GSM-R 是全球广泛使用的一种 铁路数字移动通信系统,已经使用几 十年,并且目前仍在许多铁路系统中 应用^[4]。虽然GSM-R的技术原理与 全球移动通信系统(GSM)基本相同, 但它具备铁路相关的功能。自2006 年中国青藏线、大秦线、胶济线开通 后,GSM-R相继在京津城际、武广高 铁、京沪高铁、哈大高铁等多条铁路 线上开通运营,为运输调度指挥、列 车控制及运营管理信息等提供了安 全稳定的通信网络平台。GSM-R的 上行/下行(UL/DL)峰值数据速率为 172 kbit/s,它不仅能够提供高级语音 呼叫业务,例如增强型多优先级与强 拆业务(eMLPP)、语音组呼业务

(VGCS)、语音广播业务(VBS),还可 提供GSM-R铁路特定业务,例如基 于位置的寻址、功能寻址(车次号)。 铁路交通的发展和通信技术的进步, 对铁路指挥调度系统也提出新的要 求,需要铁路移动通信系统由GSM-R 过渡到LTE-R。

(2) LTE-R

第一个 LTE-R 网络由诺基亚公 司于2016年在韩国建成[5]。它不仅 采用了先进的物理层关键技术,如正 交频分复用(OFDM)和多输入多输出 (MIMO),还采用了网络层关键技术, 如全互联网协议(IP)分组交换。 LTE-R网络能够在20 MHz带宽上为 高速移动用户提供100 Mbit/s 的数据 传输速率和低于100 ms的系统延迟。 未来的智能铁路需要更高数据速率 的业务,如实时4K/8K UHD视频传 输、列车车厢内的安全闭路电视 (CCTV)、列车远程维护。这些一般 需要每秒吉比特级的数据速率,而 LTE-R不能满足这一要求。虽然 LTE-R网络在扩展性、移动速度、网 络体验、网络保证、系统效率方面都 有显著提升,但是4G系统长期演进 升级版(LTE-A)仍不能提供一些潜 在的智能铁路业务,包括自主驾驶、 铁路互联互通等[6]。

2015年,原中国铁路总公司科技 管理部和运输局组织原中国铁道科 学研究院等单位,从频率、标准、业 务、系统研发和试验等方面对LTE-R 等技术进行全面研究和系统试验,取 得一系列研究成果;同时对5G技术、 标准、产业进行密切跟踪和研究,为 后续开展5G研究奠定基础,积累经 验。5G通信作为一种有潜力的解决 方案被国际电信联盟(ITU)提出,最 终将实现1Gbit/s的超高峰值数据速 率、1~5 ms的超低系统延迟和高于现 有网络1000倍的容量。 (3) 5G-R

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

国际铁路联盟(UIC)于2014年 正式设立未来铁路移动通信系统 (FRMCS)项目,开展铁路下一代移动 通信技术研究工作。FRMCS项目研 究下设功能、架构和技术、频谱3个工 作组。截至目前,FRMCS已发布用户 需求规范(URSV5.0.0),并计划于 2021年发布第1个完整版本的功能 需求规范(FRS)和系统需求规范 (SRS)。德国铁路计划于2019—2024 年进行5G的研究和试验,期间继续 部署 900 MHz GSM-R,并于 2025— 2034年规模部署5G^[7]。2021年1月, 中国国家铁路集团有限公司开始着 手布局铁路新基建,启动铁路5G专 网技术体系及关键技术研究。

2015年,ITU定义了3个5G应用 场景,包括增强移动宽带(eMBB)、海 量机器类通信(mMTC)和超可靠低时 延通信(URLLC)^[8]。5G技术标准由 国际标准组织第3代合作伙伴计划 (3GPP)统一制定。最新开发的无线 标准5G新空口(NR)旨在灵活地支持 不同的用例和部署场景。这些用例 和部署场景具有完全不同属性,包括 高速列车等移动性场景。NR(Rel-15)的第一个版本支持大多数 eMBB 服务和一些有限的 URLLC 服务的基 本无线接入。除此之外,3GPP还进 一步致力于全面支持 Rel-16 和 Rel-17中的5G用例和部署场景。Rel-16、Rel-17的场景包括URLLC增强、 工作于免许可频段的5G空中接口 (5G NR-U)、车用无线通信技术 (V2X)、接入和回程集成(IAB)、非地 面网络(NTN)、移动性增强等^[9]。

与之前各代移动通信技术相比, 5G频谱效率更高,支持业务和用户切 片、边缘计算、用户面和控制面分离 等,同时满足移动宽带、物联网、高可 靠低时延等场景业务需要,可为铁路

关键业务提供QoS保障,使5G的综合 承载能力得到全面提升。铁路复杂 多变的应用场景可充分发挥5G的技 术优势。

高铁具有乘客密度大、运行速度 高和传感器数量多的特点,可作为5G 的典型应用场景。5G技术的发展将 进一步推进铁路移动通信系统向 5G-R的演进。

25G-R业务

铁路移动通信业务包括两大 类^[10]:(1)与乘客相关的业务,其关键 性能指标(KPI)与公共陆地移动通信 的KPI类似,主要有用户体验速率、连 接数密度、端到端延时、移动性、流量 密度、用户峰值速率、能源效率;(2) 与列车运行控制和安全相关的业务, 其KPI包括可靠性、可用性、维修性和 安全性(RAMS)。

随着列车运行速度的提高和间 隔时间的缩短,可靠、实时、全面的列 车控制技术变得至关重要。在一个 连航空公司都在尝试为乘客提供互 联网接入的时代,如何基于5G技术 完成列控信息的高效、安全传输为高 铁旅客提供优质的5G业务,是铁路 移动通信系统迫切需要解决的问题。 5G-R即将出现的新兴业务有^[10-11]:实 时视频监控、T2T、列车多媒体调度、 铁路物联网(RIoT)和高速互联网 接入。

(1)实时视频监控。保证列车安 全行驶的一个有效措施就是部署实 时视频监控系统,即为驾驶员提供一 个"电子望远镜"以拓展视野。高清 摄像头一般沿铁路轨道安装。当前 方出现危险情况时,驾驶员可根据接 收到的前方轨道信息及时采取应急 措施。此外,视频监控也可用于列车 多媒体调度等业务。

(2)T2T。列车位置等关键信息

一般是通过车-地通信系统(T2I)在 列车间进行传输的。当地面的通信 基础设施损坏并影响正常工作时,列 车间的通信就会中断。在这种情况 下,列车无法确定同一轨道上其他行 驶列车的准确位置,追尾事故就无法 完全避免。因此,有必要部署T2T冗 余通信系统。当有紧急情况发生时, 该冗余系统能够检测到潜在的列车 碰撞,以便向当前轨道上行驶的列车 和相邻轨道上的其他列车发送预警 信息。

(3)列车多媒体调度。为了提高 铁路行车调度管理工作效率,下一代 铁路调度通信系统应能够为列车调 度员提供全方位的调度信息,包括数 据、语音、文本、图像和视频。例如, 当有灾难发生时,调度员可以通过调 度通信系统及时获取列车的视频信 息,以确保救援工作的实时开展。

(4)RIoT。大部分铁路基础设施 位于偏远地区,这给现场检查和维护 带来诸多不便。解决这个问题的关 键是发展RIoT技术。为了实时监测 铁路基础设施,如桥梁、高架桥和隧 道等的使用状态,大量传感器将会被 使用。这些传感器可将监测信息发 送至中央控制单元。采用这种方式, 一些例行的安全检查就可以在远程 控制中心完成。

(5)高速互联网接入。随着高铁的大规模铺设,为高铁旅客提供快速、高质量的互联网接入服务变得越来越紧迫。无线互联网业务应该覆盖到车厢的每一个角落。乘客不仅可以在车上上网聊天、浏览网页,还可以在线观看高清视频。

3 异构的铁路移动通信系统

铁路移动通信系统从GSM-R向 LTE-R、5G-R的发展过程可分为3个 阶段:(1)LTE-R网络逐步部署并与 GSM-R共存,其中GSM-R负责传输 安全信息与列车调度和控制有关的 数据,而LTE-R负责传输其他非安全 数据;(2)LTE-R完全取代GSM-R, 同时,5G-R将逐步负责列车间的应 急通信及车厢内旅客的互联网接入 业务;(3)5G-R得到部署,不仅能提 供每秒吉比特的数据速率和毫秒级 的系统延迟,还可提供智能铁路相关 业务。在很长的一段时期内,HSRs 移动通信系统将呈现异构化,以满足 智能铁路各种应用场景的通信需求, 包括T2I、T2T和RIoT通信等。

铁路移动通信的异构网络架构 见图1^[11]。其中,车载层由车厢内部 设备和个人终端组成,基础设施层基 于多个公用无线接入网络(例如Wi-Fi、3G、4G和5G)构建而成。对于大 多数铁路运行场景,稀疏的列车用户 接入到公共无线网络,会导致公网的 覆盖率很低,即这种接入方式是不经 济的。为了可靠地传输各种铁路业 务信息,铁路专用无线网络(例如 CSM-R、LTE-R和5G-R)将被用来作 为承载网络。

4 业务驱动的高铁异构无线网 络接入

4.1 基于马尔可夫决策过程(MDP) 的网络接入算法

已有异构网络选择算法主要侧 重于网络属性未发生变化时的当前 接入判决,未考虑选择目标网络之后 的网络属性动态变化对高速移动用 户、网络回报函数和切换判决条件的 影响。此外,不断增长的业务类型及 用户需求对网络接入的响应时间和 接入决策的准确性都提出更高的要 求,单一的智能优化算法已无法满 足^[12-14]。为此,本文中我们在高铁异 构无线网络接入选择中采用组合智



▲图1 铁路移动通信的异构网络架构

能优化策略,并将5G-R中的实时视频监控、T2T、列车多媒体调度、RIoT和高速互联网接入等业务信息流分为3类,即语音、数据和视频,并基于这3类信息流分别构建回报函数和网络选择触发条件,以使HSRs用户获得更高的期望回报值,同时减少网络切换次数。

异构无线网络中的切换选择可 被建模为一个时间离散、状态连续的 MDP^[15],其核心思想是:在一个决策 周期内对网络状态信息进行采样,然 后由各采样时刻的立即回报函数构 成回报函数序列,并以最大化期望回 报值作为移动用户的最优网络切换 决策。假设HSRs异构无线网络的重 叠覆盖区域内有 M个候选网络,且移 动用户的 QoS 属性参数包括当前网 络可用带宽(B)、时延(D)、抖动(J)、 丢包率(P)和价格(E),则网络的状态 空间 S可表示为公式(1):

 $S = \{1, 2, \cdots, M\} \times B^{1} \times D^{1} \times J^{1} \times P^{1} \times E^{1} \times B^{2} \times D^{2} \times J^{2} \times P^{2} \times E^{2} \times \cdots \times B^{M} \times D^{M} \times J^{M} \times P^{M} \times E^{M}, \qquad (1)$

其中, B^N、D^N、J^N、P^N、E^N分别表示连接 网络的当前可用带宽、时延、抖动、丢 包率和价格的集合。由于用户业务 具有多样性,不同业务类型对网络参 数有不同的要求和满意度^[16],因此需 要根据业务类型设计不同的回报函 数 f(s,a),以使用户能合理地选择网 络,减少不必要的切换次数。考虑移 动用户的 QoS 属性, f(s,a)的表达式可 写为公式(2):

▼表1 语音业务用户A中的元素值和属性权重值

$f(s,a) = w_B f_B(s,a) + w_D f_D(s,a) +$	
$w_J f_J(s,a) + w_P f_P(s,a) + w_E f_E(s,a),$	
(2	2)

李翠然 等

其中, f_b(s,a)、f_D(s,a)、f_f(s,a)、f_P(s,a)和 f_E(s, a)分别为带宽属性、时延属性、抖动属 性、丢包率属性和接入网络所需价格 属性的回报函数, w_x为不同业务类型 的回报函数对应的权重因子。权重 因子反映了 QoS 属性在构建回报函 数中的地位或作用,直接影响着综合 决策的结果。

基于模糊层次聚类理论计算 QoS 属性权重值的原理为:将网络选择问 题分解为目标层、属性层和方案层, 并从成对比较判断矩阵 **A**中导出属 性权重,测量成对比较矩阵的一致 性,之后计算 QoS 属性在不同业务下 的权重值。矩阵 **A**中的各元素值和 属性权重值见表 1—表 3^[17]。

4.2 仿真结果

在人工智能算法中,遗传算法 (GA)是一种用于解决最优化问题的 搜索算法,具有较强的全局搜索能 力,但收敛速度慢,局部搜索能力弱, 且运行结果易受到参数设置的影响。 模拟退火算法(SA)的局部搜索能力

	3/		•		
语音业务	带宽	时延	抖动	丢包率	价格
带宽	1	1/7	1/6	1/3	1/3
时延	7	1	2	3	7
抖动	6	1/2	1	3	6
丢包率	3	1/3	1/3	1	2
价格	3	1/7	1/6	1/2	1
权值	0.0437	0.4403	0.3142	0.1274	0.0743

▼表2 数据业务用户A中的元素值和属性权重值

21 2000	1 - 07 0				
数据业务	带宽	时延	抖动	丢包率	价格
带宽	1	3	3	1/6	2
时延	1/3	1	1	1/9	1/4
抖动	1/3	1	1	1/9	1/3
丢包率	6	9	9	1	4
价格	1/2	4	3	1/4	1
权值	0.1647	0.0499	0.0522	0.5925	0.1407

▼表3	视频业务用户	A中的元素值	直和属性权重值
-----	--------	--------	---------

视	频业务	带宽	时延	抖动	丢包率	价格
i	带宽	1	3	9	3	2
	时延	1/3	1	9	1	1/2
	抖动	1/9	1/9	1	1/9	1/8
Ę	医包率	1/3	1	9	1	1/2
t	价格	1/2	2	8	2	1
i	权值	0.4056	0.1581	0.0268	0.1581	0.2514

强,可以弥补GA算法的不足。因此, 可采用GA-SA算法来求解期望回报 函数的最大值问题。算法步骤包括 初始化参数、编码和产生初始种群、 计算当前群体中各个种群的适应度、 执行选择操作并采用精英保留策略 避免群体退化、执行交叉与变异操 作、验证搜索结果、终止演化等。

算法仿真中,网络属性参数设置 见表4^[18]。其中,第一个参数值为网 络属性的默认值,括号中的数值为网 络属性动态变化时的取值范围。假 设语音业务用户、视频业务用户和数 据业务用户均按照泊松分布到达异 构无线网络区域,到达率分别为1~

▼表4 候选网络属性参数

12、2~18、1~8(呼叫数/s),相邻两个决	5
策时刻的时间间隔为15 s。	

令λ∈(0,1]为MDP模型的折扣因子,图 2(a)、2(b)和2(c)分别给出了折扣因 子与语音、数据和视频业务用户的期 望回报之间的关系。图2中,我们将 本文提出的IMDP(改进的马尔可夫 决策过程)与基于马尔可夫决策模型 (MDM)的算法^[19]和多属性决策-简单 加权(MADM-SAW)算法^[20]进行对 比。由图2可知,随着折扣因子值λ 的增大,3种算法的期望回报值均呈 递增趋势。这是因为λ反映了算法 对网络长期收益的关注程度。同时, 较大的λ值对应较长的平均连接持

候选网络	帯宽/(kbit・s-²)	时延/ms	抖动/ms	丢包率/%	价格
网络1	1 100(700 ~ 2 000)	60(30~200)	15(10~30)	4(2~10)	20(5~40)
网络2	2 500(800 ~ 4 000)	45(20~150)	20(15~40)	10(6~20)	30(10~45)
网络3	7 200(1 000 ~ 8 000)	120(80~300)	60(30~80)	6(4~15)	10(0~35)

续时间,从而使3种算法的期望回报 差距也随之增大。

图 3(a)、3(b)和3(c)分别为不同 折扣因子值时的语音、数据和视频业 务用户的网络切换次数。可以看出, 随着折扣因子值λ的增大,3种算法 的切换次数也在增加。这是因为较 大的λ值对应较长的平均连接持续 时间和较多的决策时刻点,从而增加 了网络切换的可能性。与其他两种 算法相比,本文提出的算法具有较少 的切换次数。这是因为我们在算法 中设置了预切换判决条件以避免"乒 乓",同时基于不同业务类型设计了 触发判决条件,以满足不同类型用户 的业务需求,有效地减少了不必要的 切换。

5 结束语

高铁是5G典型应用场景之一。 基于5G技术完成列车运行控制与安 全相关业务、乘客相关业务的高效、 安全传输是铁路移动通信系统迫切 需要解决的问题。高铁场景下公用 无线接入网络(Wi-Fi、4G和5G)和铁 路专用无线网络(CSM-R、LTE-R和 5G-R)等多个异构网络在相当的长 时间内会共存。5G-R新业务的出现



▲图2 不同业务类型用户的期望回报值

专题



▲图3 不同业务类型用户的切换次数

给异构无线网络接入带来新的设计 挑战。采用人工智能、优化理论来研 究HSRs异构网络接入等关键技术符 合未来智能铁路的发展愿景。

参考文献

- CommissionEuropean. Shift2Rail innovation program 2 [EB/OL]. [2021-06-25]. https:// shift2rail.org/research-development/ip2
- [2] 国家铁路局.《铁路数字移动系统(GSM-R)设计 规范》: TB 10088-2015 [S]. 2015
- [3] SNIADY A, SOLER J. An overview of GSM–R technology and its shortcomings [C]// Proceedings of 2012 IEEE International Conference on ITS Telecommunications. Taiwan, China: IEEE, 2012: 626–629. DOI: 10.1109/ ITST.2012.6425256
- [4] HE R S, AI B, WANG G P, et al. High-speed railway communications: from GSM-R to LTE-R [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2016, 11(3): 49–58. DOI: 10.1109/ MVT.2016.2564446
- [5] Mobile Europe & European Communications. Nokia to install LTE-R for railway services in South Korea [EB/OL]. (2016–11–14) [2021– 06–25]. https://www.mobileeurope.co.uk/ press-wire/12079-nokia-to-install-Ite-rfor-railway-services-in-south-korea
- [6] AI B, GUAN K, RUPP M, et al. Future railway services-oriented mobile communications network [J]. IEEE communications magazine, 2015, 53(10): 78–85. DOI: 10.1109/ MCOM.2015.7295467
- [7] 王同军. 铁路5G关键技术分析和发展路线 [J]. 中国铁路, 2020, 701(11): 7-15
- [8] Ericsson. The power of 5G is here and will continue to spread across the globe in the coming years [EB/OL]. [2021–06–25]. https:// www.ericsson.com.
- [9] NOH G, HUI B, KIM I. High speed train communications in 5G: design elements to mitigate the impact of very high mobility [J]. IEEE wireless communications, 2020, 27(6): 98– 106. DOI: 10.1109/MWC.001.2000034
- [10] AI B, MOLISCH A F, RUPP M, et al. 5G key technologies for smart railways [J]. Pro-

ceedings of the IEEE, 2020, 108(6): 856-893. DOI: 10.1109/JPROC.2020.2988595

- [11] CHEN R, LONG W, MAO G, et al. Development trends of mobile communication systems for railways [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2018, 20(4): 3131–3141. DOI: 10.1109/COMST.2018.2859347
- [12] CHEN L, LI H. An MDP-based vertical handoff decision algorithm for heterogeneous wireless networks[C]//Proceedings of 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Doha, Qatar: IEEE, 2016: 1– 6. DOI: 10.1109/WCNC.2016.7564804
- [13] GAO X, LI K. Joint call admission control algorithm based on Markov chain [J]. Computer engineering and applications, 2017, 53 (2): 32–37
- [14] CHEN J, ZHANG D, LIU D, et al. A network selection algorithm based on improved genetic algorithm [C]//Proceedings of 2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology. Chongqing, China: IEEE, 2018: 209–214. DOI: 10.1109/ ICCT.2018.8600265
- [15] SHARNA S A, AMIN M R, MURSHED M. An enhanced–MDP based vertical handoff algorithm for QoS support over heteroge– neous wireless networks [CI//Proceedings of 2011 IEEE 10th International Symposium on Network Computing and Applications. Cambridge, MA, USA: IEEE, 2011: 289–293. DOI: 10.1109/NCA.2011.49
- [16] GOYAL R K, KAUSHAL S, SANGAIAH A K. The utility based non-linear fuzzy AHP optimization model for network selection in heterogeneous wireless networks [J]. Applied soft computing, 2018, 67: 800–811. DOI: 10.1016/j.asoc.2017.05.026
- [17] XIE J L, GAO W J, LI C R. Heterogeneous network selection optimization algorithm based on a Markov decision model [J]. China communications, 2020, 17(2): 40–53
- [18] SANGAIAH A K, GOPAL J, BASU A, et al. An integrated fuzzy DEMATEL, TOPSIS, and ELECTRE approach for evaluating knowledge transfer effectiveness with reference to GSD project outcome [J]. Neural computing and applications, 2017, 28(1): 111–123
- [19] LIANG X, QIAN Z, TIAN H, et al. Heterogeneous wireless network switching selection

algorithm based on Markov decision model [J]. Acta physica sinica, 2016, 65(23): 206-214

[20] STEVENS–NAVARRO E, MARTINEZ–MO– RALES J D, PINEDA–RICO U. Evaluation of vertical handoff decision algorithms based on MADM methods for heterogeneous wireless networks [J]. Journal of applied research and technology, 2013, 10(4): 534–548



面向高速移动的毫米波 信道估计

Channel Estimation for mmWave Communications under High-Speed Mobility

左世元/ZUO Shiyuan,范戎飞/FAN Rongfei (北京理工大学,中国北京 100081) (Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

摘要:准确及时的信道估计对实现高铁应用场景中的高吞吐量毫米波通信具有重要作用。然而,由于列车高速移动,信道条件变化迅速,频繁测量将带来巨大开销。针对上述问题,利用列车与基站间信道到达角(AoA)与离开角(AoD)经常性连续变化、偶发性骤变的特征,设计AoA与AoD连续变化跟踪与骤变检测算法。在信道AoA与AoD变化符合预期时,基于角度先验信息测量部分信道参数;在AoA与AoD发生骤变时,第一时间报警并通知系统重新测量信道整体参数。设计的收发机波束成形算法可提升AoA与AoD变化跟踪与骤变检测的性能。提出的混合方案可有效降低高速移动条件下的毫米波信道估计信令开销。高速移动对无线信道带来的快衰落影响,并且系统误比特率性能也得到了明显改善。

关键词:高铁;毫米波通信;信道估计

Abstract: Accurate and timely channel estimation plays an important role in realizing highthroughput millimeter wave communication in high-speed railway application scenarios. However, due to the high-speed movement of trains, the channel conditions change rapidly, and frequent measurements will bring huge overhead. Aiming at the above problems, based on the characteristics of frequent continuous changes and occasional sudden changes in the channel of the angle of arrival (AoA) and the angle of departure (AoD) between the train and the base station, the AoA and AoD continuous changes tracking and sudden changes detection algorithms are designed. When the AoA and AoD changes are in line with expectations, some parameters of the channel are measured based on the angle prior information, and when the AoA and AoD change suddenly, they will be alerted and notified to remeasure the overall channel parameters. The transceiver beamforming algorithm is designed to improve the performance of the tracking of AoA and AoD continuous changes and the detection of sudden changes. Through the hybrid scheme, the overhead of millimeter wave channel estimation signaling can be effectively reduced under high-speed mobile conditions.

Keywords: high-speed railway; millimeter wave; channel estimation

 铁是目前中短距离出行的重要 交通工具,全程时间短,运送能 力大,受气候影响小。在高铁上架载 毫米波通信收发机与地面基站建立 连接,可发挥大吞吐量的技术优势,

为高铁乘客提供高速率无线接入,满 足乘客5G时代的通信需求^[1-2]。毫米 波频段具有高衰减特征,需要精确的 信道状态信息(CSI),以生成指向性 强波束并实现高吞吐量通信。 毫米波的CSI由收发机间角度信息和每条传播路径的信道系数构成, 其中,角度信息包括收发端有限条传播路径的离开角(AoD)和到达角 (AoA)。信道估计是指收端通过发端

DOI:10.12142/ZTETJ.202104006 网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/ detail/34.1228.tn.20210727.1117.002.html

网络出版日期:2021-07-27 收稿日期:2021-06-21



多次发射的导频信号解算 CSI。传统 方法单次测量角度信息和信道系数, 包括多阶段扇区穷举搜索 AoA 和 AoD^[3],或利用路径数的稀疏性,使用 相对较少信令和正交匹配跟踪 (OMP)等稀疏信号处理的方法来恢 复信道信息^[4-5]。然而,上述方法仍然 需要较多导频序列以完成单次测量, 在列车高速移动时更需要频繁更新 CSI。这将造成较大开销,降低通信 效率。

列车与当前地面基站之间的 AoD 和 AoA 呈现连续性变化。当这 种变化持续到下一个地面基站出现 时,信道角度信息将发生骤变。基于 波東跟踪的算法^[6]虽然可以对AoA和 AoD的连续变化进行跟踪,但是当信 道角度信息发生骤变时,该算法将失 效。对此,本文设计了AoA和AoD的 跟踪预测算法,并实时判断是否会出 现新基站。当判断结果显示未出现 新基站连接时,可根据AoA和AoD的 预测值缩减其搜索空间,简化信道估 计;当出现新基站连接时,将报警通 知系统采用传统方法^[5]来重新测量角 度信息和信道系数。为加强 AoA 和 AoD的跟踪预测能力和角度信息骤 变检测能力,本文还设计了收发端波 束成型算法。整体而言,本文在信道 估计过程中降低了测角开销,提升了 通信效率。

本文中,我们会使用到一些符 号。例如, I_N 表示一个 $N \times N$ 的单位 矩阵, $0_{m \times n}$ 表示一个 $m \times n$ 的零矩 阵, $A \cdot B = tr(AB)$ 。

1系统模型

假设地面基站配备 n_i个线性天 线阵元,列车接收机配备 n_r个线性天 线阵元。不失一般性,关注下行链 路,且上行链路可根据对称性反推, 我们将给出系统信道模型、角度时变 模型、基站切换信号检测模型和波束 成形模型的具体描述。

1.1 信道模型

假设信道包含 L条散射链路,这 些链路构成集合 $C_o \lambda$ 为毫米波的波 长,d为天线间距,并且天线间距足够 小,收发机间距离足够大。这些假设 使得模型的参数对于每个天线阵元 都相同。令 $d = \frac{1}{2}\lambda$,即该系统为半 波长空间的均匀线性天线阵列,同时 该系统为窄带系统(相对于毫米波载 波而言),那么由此得到的毫米波信 道为平坦衰落信道。假设第1条信道 AoD和 AoA分别为 $\theta_i 和 \varphi_i$,复信道增 益系数为 α_i ,则对于第*i*个传输符号, 在时隙 k时,根据上述条件以及文献 [7]中的论述,高速移动条件下毫米波 信道矩阵可表示为:

$$\begin{aligned} \prod_{l=1}^{L} \alpha_{l}[k] = \sum_{l=1}^{L} \alpha_{l}[k] e_{r}(\varphi_{l}[k]) e_{l}^{H}(\theta_{l}[k]) e^{l^{2\pi f_{d,k} i \cos \varphi_{l}[k]}}, (1) \\ \downarrow \oplus e_{t}(\vartheta) = \frac{1}{\sqrt{n_{t}}} \left[1.e^{j\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \vartheta} \cdots e^{j\frac{2\pi d}{\lambda} (n_{t}-1) \sin \vartheta} \right]^{T}, \\ e_{r}(\beta) = \frac{1}{\sqrt{n_{r}}} \left[1.e^{j\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \vartheta} \cdots e^{j\frac{2\pi d}{\lambda} (n_{r}-1) \sin \vartheta} \right]^{T} \circ f_{d,k} \\ \end{pmatrix} \text{ br lig } k \text{ th } \downarrow \text{ th } \text$$

1.2 角度时变模型

 \mathbf{H} [h] –

毫米波信道中的传播路径变化 (对应角度信息变化)主要有两种: (1)列车与当前基站间传播路径的变 化;(2)列车驶离当前基站与下一基 站建立连接所产生的路径突变。这 里我们先考虑第1种变化因素,此时 AoA和AoD连续变化,并假设已经完 成对信道角度信息的预估计。 本论文考虑对角度变化的跟踪, 即跟踪 AoA 和 AoD。考虑到毫米波 路径散射造成的跟踪误差,假设跟踪 误差为高斯分布,根据上述条件以及 文献[8]中的论述,得到 AoA 与 AoD 的 演 化 模 型 为 : $\theta_l[k] = \theta_l[k-1] + u_{\varphi_l}[k], \varphi_l[k] = \varphi_l[k-1] + u_{\varphi_l}[k], 其$ $中 u_{\theta_l} \sim N(0, \sigma_{\theta_l}^2), u_{\varphi_l} \sim N(0, \sigma_{\varphi_l}^2)).$

令
$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_L], \quad \boldsymbol{\varphi} = [\varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_L], \boldsymbol{x} = [\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}]^T, 则有:$$

$$\boldsymbol{x}_k = \boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{u}_k, \qquad (2)$$

其中 $u \sim N(0, \Sigma)$, $\sigma_{\theta} = [\sigma_{\theta,1}, \sigma_{\theta,2}, \cdots, \sigma_{\theta,L}]$, $\sigma_{\varphi} = [\sigma_{\varphi,1}, \sigma_{\varphi,2}, \cdots, \sigma_{\varphi,L}], \Sigma = \text{Diag}([\sigma_{\theta}, \sigma_{\varphi}])_{\circ}$

1.3 基站切换信号检测模型

当高铁运行至下一基站的范围 时,用户不会主动断开与上一基站的 通信信号,同时会收到下一基站发来 的信号。为了使检测模块更容易发 现突变,需要进行基站切换性能增强 的波束设计。在这种情况下,突变发 生前接收到的信号为复信号,因此信 号能量为 $2n_in_r$ 个均值为0、方差为 $\frac{\sigma_n^2}{2}$ 的高斯随机变量的和,即信号能量服 从自由度为 $2n_in_r$ 的 χ^2 分布:

$$f_0^E = \chi^2_{2n_r n_{r_0}}$$
(3)

根据文献[9],突变后的信号能量 可近似为高斯分布:

$$\tilde{f}_1^E = N(\sigma^2 + n_t n_r \sigma_n^2, \sigma^4 + 2\sigma^2 \sigma_n^2 + n_t n_r \sigma_n^4),$$
(4)

其中, σ^2 为接收信号的方差。

1.4 波束成形模型

在收发端的数模混合波束成形 向量为: $f = F_{RF} f_{BB}$, $w = w_{BB} W_{RF}$ 。其 中 F_{RF} 、 W_{RF} 分别为发射机模拟波束 成形矩阵和接收机模拟合并矩阵, f_{BB} 、 w_{BB} 分别为发射机数字波束成形 考虑一路数字波束成形器后接两个模拟波束成形器,此时混合数模 波束成形问题可以等效为全数字波 束成形问题。假设发射信号为s,那 么接收器得到的信号可表示为 $y = w^{\mu}Hfs + w^{\mu}q$,其中q为复高斯噪声向 量,满足 $q\sim CN(0,\sigma_{v}^{2}I_{n,})$ 。

对于时隙 k,令 s=1,可以得到:

$$y(\boldsymbol{x}_k) = \boldsymbol{w}^H \boldsymbol{H}(\boldsymbol{x}_k) \boldsymbol{f} + \boldsymbol{w}^H \boldsymbol{q}_k , \qquad (5)$$

其中 q_k 表示角度信息为 x_k 时的随机 噪声向量。 $\gamma(\mathbf{x}_k)$ 表示角度信息为 \mathbf{x}_k 、 发射端波束成形向量为f、接收端波 束成形向量为w时接收机收到的信 号。如果变换发射端与接收端的波 束成形系数并进行多次测量(本文取 L次),则接收信号为 $y_i(\mathbf{x}_k)$ = $w_l^H H(x_k) f_l + w_l^H q_{kl}$,其中 q_{kl} 表示第l次产生的随机噪声向量, $\gamma_i(\mathbf{x}_i)$ 表示 角度信息为x₁发射端波束成形向量 为f、接收端波束成形向量为w时接 收机收到的信号(合并之后)。 $H(\mathbf{x}_k)$ 表示角度信息为x,时的信道矩阵。 为方便起见,将L次观测量组合为观 测量向量,可以得到 $\gamma(\mathbf{x}_k)$ = $\left[y_1(\mathbf{x}_1), y_2(\mathbf{x}_2), \cdots, y_L(\mathbf{x}_k)\right]^T$ 。那么在时 隙为k时向量 $\gamma(x)$ 与x的关系可表 示为:

$$\boldsymbol{y}(\boldsymbol{x}_k) = \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}_k) + \boldsymbol{v}_k, \qquad (6)$$

2 问题构建与算法设计

本节基于系统模型,首先提出高 速移动条件下的信道估计解决思路, 然后针对每个环节,构建具体的数学 问题并给出相应的算法设计。问题 解决流程如图1所示。

2.1 问题构建

2.1.1 基站切换检测问题

当高铁运行至两个基站的交界 处时,需进行基站切换检测。如果不 需切换基站通信,且列车与当前基站 间的AoA与AoD处于连续变化中,可 根据最近的角度信息预估当前角度 信息,简化信道估计。如果需要切换 到下一基站,AoA和AoD的历史信息 将不再具有参考价值,需要重新运行 传统的信道估计方法,以完成角度信 息和信道状态信息的估计。

根据系统模型中的公式(3)和公 式(4),信号在新基站出现前后(突变 前后)的概率密度函数是不同的,因 此模型设计的目标是第一时间检测 到突变发生。不同于传统二元检测, 检测目标为最小化检测时延,限制条 件是约束虚警事件。这里,我们 定义 ARL(*T*) = *E*_x{*T*}, WDD(*T*) = $\sup_{\Omega} \operatorname{ess\,sup} \operatorname{E}_{\nu} \{ (T - \nu)^{\dagger} | y_0, y_1, \cdots, y_{\nu-1} \}_{\circ}$

其中,*T*代表检测器报警时间, ν 代表 接收信号能量发生突变的真实时间, *T*与 ν 都属于随机变量。 E_{μ} 代表真实 突变时间点概率测度下的期望,属于 随机变量。 E_{s} 代表无突变时概率测 度下的期望。ess sup代表一门限值, y_{k} 代表k时刻接收的信号。平均运行 长度(ARL)是无突变时检测器报警 时间,为虚警的度量。WDD是最差 条件下的平均检测时延,为检测时延 的度量。我们将检测问题定义为 问题1:

$$\min_{T \ge 0} WDD(T) \tag{7a}$$

s.t.
$$\operatorname{ARL}(T) \ge T_{th}$$
, (7b)

其中T_{th}代表约束虚警的判决门限。

2.1.2 连续变化路径角度跟踪预测 问题

如果不需要切换基站通信,并且 列车与当前基站间的角度信息是连



▲图1 高速移动条件下毫米波信道估计流程

面向高速移动的毫米波信道估计 ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

(9a)

(10e)

左世元 等

续变化的,那么此时需要对角度信息 进行跟踪与预测。当预测的角度准 确时,则无须发射大量的导频序列测 角,仅需要测量信道系数。考虑在时 隙k时,在已知{ $y(x_0),y(x_1),...,y(x_k)$ } 的情况下,为了得到用于k+1时隙时 导频设计的角度信息,我们构建一个 跟踪问题。

问题2:

$$\min_{\mathbf{x}_{klk}} \mathbb{E}\left\{ \left\| \mathbf{x}_{k} - \mathbf{x}_{klk} \right\|_{2}^{2} \right\}, \qquad (8)$$

其中, \mathbf{x}_{klk} 表示时隙 k时对角度信息的 估计值, \mathbf{x}_k 表示时隙 k时角度信息的 真实值, $\|\cdot\|_2$ 表示 Euclid 范数。 \mathbf{x}_{klk} 为 用于 k+1时隙时导频设计的角度 信息。

2.1.3 波束跟踪信号增强波束成形设计

为增强波束跟踪预测导频信号, 可在收发两端利用波束成形技术,将 信号能量聚集在跟踪预测所提供的 路径方向上。由于收发端的设计具 有相似性,我们仅以发端为例展开讨 论,接收端的w也可依相同方法得 到。考虑跟踪到的角度信息可能出 现误差,为了增加系统的鲁棒性,发 射端波束成形的设计目标是尽量增 强指定方向及其周围附近几个离散 角度的信号强度,同时压制其他方向 的信号辐射。根据这一目标,跟踪预 测到的 AoA 与 AoD 周围各增加 n 个离 散角度,于是新的AoA与AoD向量可 以表示为: $\varphi' = [\varphi_{n1} - \varphi_{n1}]$ $n\Delta\varphi, \cdots, \varphi_{p,1}, \cdots, \varphi_{p,1} + n\Delta\varphi, \cdots, \varphi_{p,L}$ $n\Delta\varphi, \cdots, \varphi_{nL}, \cdots, \varphi_{nL} + n\Delta\varphi$, $\theta' = [\theta_{nL} - \theta_{nL}]$ $\Delta n\theta, \dots, \theta_{p,1}, \dots, \theta_{p,1} + n\Delta\theta, \dots, \theta_{p,L}$ $n\Delta\theta, \dots, \theta_{pL}, \dots, \theta_{pL} + n\Delta\theta$]。其中 φ_{pl} 与 θ_{nl} 为跟踪后得到的 AoA 与 AoD, $\Delta \varphi$ 与 $\Delta \theta$ 为离散空间角度的最小量化值,一 般情况下 $\Delta \varphi = \Delta \theta$ 。由此我们可以构 建新的毫米波散射路径集合(\mathcal{L})。 由于多普勒频移影响因子的模为1, 对增益大小没有影响,因此计算时可 不做考虑。根据上述条件,波束成形 向量f的优化设计问题如问题3所示。 问题3:

$$\max_{f,t} t$$

s.t. $f^{H} \boldsymbol{e}_{\iota}(\boldsymbol{\theta}_{l}') \boldsymbol{e}_{\iota}^{H}(\boldsymbol{\theta}_{l}') \boldsymbol{f} \ge t \ \forall l \in \mathcal{L}' (9b)$ $f^{H}(\boldsymbol{\Sigma}_{l \notin \mathcal{L}'} \boldsymbol{e}_{\iota}(\boldsymbol{\theta}_{l}') \boldsymbol{e}_{\iota}^{H}(\boldsymbol{\theta}_{l}')) \boldsymbol{f} \le \boldsymbol{\varepsilon}_{\iota} (9c)$ $f^{H} \boldsymbol{f} \le P$, (9d)

其中P为发射端最大功率。

问题3是非凸问题。为便于求 解,对公式(9b)、(9c)以及(9d)进行 变形处理,可得到问题4。 问题4:

 $\begin{array}{l} \max_{F,t} t & (10a) \\ \text{s.t. } F' \bullet E_{t,l} \ge t \; \forall l \in \mathcal{L} \\ F' \bullet E_t' \le \varepsilon_t & (10c) \\ F' \bullet I \le P & (10d) \end{array}$

 $\operatorname{rank}(\mathbf{F}') = 1$,

其 中 $F' = ff^{H}$, $E_{i,l} = e_{i}(\theta_{i}')e_{i}^{H}(\theta_{l}')$, $E_{i}' = \Sigma_{i,a,c} \cdot e_{i}(\theta_{i}')e_{i}^{H}(\theta_{i}')$, I为单位矩阵。

2.1.4 基站切换检测性能增强波束成 形设计

当接收机进行基站切换检测时, 为提高检测器分辨能力,应加强来自 新基站路径方向的信号能量,同时削 弱原基站路径方向能量。 问题5:

$$\min_{\boldsymbol{w}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \boldsymbol{w}^{H} \boldsymbol{e}_{r}(\boldsymbol{\varphi}_{l}) \boldsymbol{e}_{r}^{H}(\boldsymbol{\varphi}_{l}) \boldsymbol{w} \qquad (11a)$$

s.t. $w^{H}(\Sigma_{l \notin \mathcal{L}} e_{r}(\varphi_{l}) e_{r}^{H}(\varphi_{l})) w \ge \varepsilon_{r}$, (11b) 其中 \mathcal{L} 表示原基站到达路径集合, ε_{r} 表示原基站之外路径方向信号增强 的最低门限。问题 5 同样具有非凸 性。为简化计算, 我们将问题 5 等价 转化为问题 6。 问题 6:

$$\min_{\mathbf{W}',\iota} t \tag{12a}$$

s.t. $\boldsymbol{W}' \bullet \boldsymbol{E}_r \leq t$ (12b)

$$\boldsymbol{W}' \boldsymbol{\cdot} \boldsymbol{E}_r' \ge \boldsymbol{\varepsilon}_r \tag{12c}$$

$$\operatorname{rank}(\boldsymbol{W}') = 1 , \qquad (12d)$$

其中 $W' = ww^H$, $E_r = \Sigma_{l \in \mathcal{L}} e_r(\varphi_l) e_r^H(\varphi_l)$, $E'_r = \Sigma_{l \notin \mathcal{L}} e_r(\varphi_l) e_r^H(\varphi_l)$ °

2.2 算法设计

2.2.1 基站切换检测算法

为解决问题 1,需要测量并选取 接收信号的能量,即 $e(k) = ||y(k)||^2$ 。 根据信号检测理论,累计和(CUSUM) 统计量接近问题 1的渐进最优解。具 体而言,CUSUM统计量定义如下:

$$\tilde{G}^{E}[k] = \max\left\{0, \left(\tilde{G}^{E}[k-1] + \log\frac{\tilde{g}_{1}^{E}(e(k))}{g_{0}^{E}(e(k))}\right)\right\},$$
(13)

其中, \tilde{G}^{E} [-1]=0,t≥0代表观测序 列的索引, g_{1}^{E} (e(t))和 g_{0}^{E} (e(t))分别 表示信号e(t)的原信号y(t)在 f_{1}^{E} (·) 和 f_{0}^{E} (·)下的概率密度函数。根据文 献[10]中的证明与文献[9]中的结论, 使用CUSUM算法可保证算法平均 检 测 时 延 渐 进 收 敛 于 WDD(T)~ $\frac{\log(ARL(T))}{\log}$ 。

$$\operatorname{KL}(\tilde{g_1^E} || g_0^E) - \operatorname{KL}(\tilde{g_1^E} || g_1^E)$$

其中,KL(allb)表示概率密度函数a与 b的K-L散度, g_1^{ι} 表示在信号e(t)变化 后的实际概率密度函数。

CUSUM算法具体实现过程如算法1所示。

算法1 CUSUM算法

1:接收器接收到信号时,计算 $e(k) = \|y(k)\|^2_{\circ}$

2:将e(k)代入公式(13)中,计算出

 $ilde{G}^{\scriptscriptstyle E}$ [k] $_{\circ}$

3:如果 \tilde{G}^{ε} [k]大于检测阈值 $\eta(\eta$ 值可根据ARL约束推算):

4: 判断列车需进行基站切换。5:否则:

6: 继续检测。

在实际应用中,如果已知各基站 的位置信息,可在列车接近下一个基 站时启动上述检测算法,以进一步减 少信令开销。

2.2.2 角度信息跟踪预测算法

为了解决问题 2, 我们使用卡尔 曼滤波跟踪算法。由于公式(6)中 x与 y(x) 为非线性关系, 在时隙为 k时, 对 g(x) 函数进行一阶泰勒展开, 从 而 使问题 2 线性化, 如公式(14) 所示:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{y}\left(\boldsymbol{x}_{k}\right) &= \boldsymbol{g}\left(\boldsymbol{x}_{k|k-1}\right) + \\ \left. \frac{\partial \boldsymbol{g}\left(\boldsymbol{x}_{k}\right)}{\partial \boldsymbol{x}_{k}} \right|_{\boldsymbol{x}_{k} = \boldsymbol{x}_{k|k-1}} \left(\boldsymbol{x}_{k} - \boldsymbol{x}_{k|k-1}\right) + \boldsymbol{v}_{k} \\ & , (14) \end{aligned}$$

其中 x_{ki} 为基于{ $y(x_0), y(x_1), \dots, y(x_i)$ } 使用最小均方误差(MMSE)算法后得 到的角度预测值,即先验值。

令
$$C_k = \frac{\partial \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}_k)}{\partial \boldsymbol{x}_k} \bigg|_{\boldsymbol{x}_k = \boldsymbol{x}_{kk-1}}, C_k$$
代人公

式 (14) 后,公式 (14) 可被化简为 $y(x_k) = g(x_{k|k-1}) + C_k(x_k - x_{k|k-1}) + v_k$ 。

为准确跟踪 AoD 和 AoA, 令 x 的 均方误差 P_{x,kk-1} 最小, 由文献[11]以 和上述推论可知, 卡尔曼滤波增益可 用公式(15)表示:

$$x_{kk-1}$$
)^{*u*}}, **R**为信道噪声的协方差矩阵。
在时隙 *k*时的卡尔曼估计值为:

$$\boldsymbol{x}_{k|k} = \boldsymbol{x}_{k|k-1} + \boldsymbol{K}_{k} \, \boldsymbol{y}_{k} \,, \qquad (16)$$

其中
$$\tilde{y}_{i} = y_{k} - g(x_{k|k-1})$$

为了使得下一次卡尔曼滤波跟 踪成立, **P**_{x,tk}可表示为:

$$\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{x},\boldsymbol{k}\boldsymbol{k}\boldsymbol{k}} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_{\boldsymbol{k}}\boldsymbol{C}_{\boldsymbol{k}})\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{x},\boldsymbol{k}\boldsymbol{k}\boldsymbol{k}-1} \circ \qquad (17)$$

根据文献[12]可知,此时公式(2) 和公式(6)满足卡尔曼滤波框架要 求,可根据卡尔曼滤波跟踪算法解决 信道跟踪问题。

得到的扩展卡尔曼滤波算法总 结在算法2中。

算法2	扩展卡尔曼滤波算法
1:预测	状态:
$oldsymbol{x}_{k k}$ –	$\mathbf{x}_{k-1 k-1}$
$P_{x,k k}$	$\mathbf{P}_{x,k-1 k-1} + \boldsymbol{\Sigma}$
2:求出	卡尔曼增益:
$K_k =$	$\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{x},\boldsymbol{k}\boldsymbol{k}\boldsymbol{s}-1}\boldsymbol{C}_{\boldsymbol{k}}^{H}(\boldsymbol{C}_{\boldsymbol{k}}\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{x},\boldsymbol{k}\boldsymbol{k}\boldsymbol{k}-1}\boldsymbol{C}_{\boldsymbol{k}}^{H}+\boldsymbol{R})^{-1}$
3:估计	预测结果:
$\tilde{y}_{k} =$	$\boldsymbol{y}_k - \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}_{k k-1})$
$\boldsymbol{x}_{k k}$ =	$= \boldsymbol{x}_{k k-1} + \boldsymbol{K}_k \tilde{\boldsymbol{y}}_k$
$P_{x,k k}$	$= (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_k \boldsymbol{C}_k) \boldsymbol{P}_{x,k k-1}$

其中 $P_{x,00} = \mathbf{0}_{2L \times 2L}$, **R**为信道噪声的协 方差矩阵, 且 $\mathbf{R} = \sigma_{v}^{2} \mathbf{I}_{L^{\circ}}$

2.2.3 波束成形设计算法

由于本文所描述的两类波束成 形设计问题具有相似性,因此它们的 求解过程都在本节给出。对于问题 4,由于公式(10e)中rank(F')=1是非 凸约束的,为求解问题4,可先将其松 弛为凸问题(问题7)。 问题7:

 $\max_{F_{i,l}} t$ (18a) s.t. $F' \bullet E_{i,l} \ge t \ \forall l \in \mathcal{L}'$ (18b) $F' \bullet E_{i}' \le \varepsilon_i$ (18c)

$$\boldsymbol{F'} \boldsymbol{\cdot} \boldsymbol{I} \leqslant \boldsymbol{P} \circ \tag{18d}$$

当固定t值时,问题7则属于半定 规划问题。对于最优t值,我们可使 用二分法来搜索。具体流程可参考 算法3。

算法3 二分法

1:初始化 t_{L} 、 t_{U} , 且 t_{L} 令问题不可解, t_{U} 令问题可解(在验证可解性时, 调用 CVX 半定规划算子), $t_{s} = \frac{t_{L} + t_{U}}{2}$ 。 2:当不满足 $|t_{L} - t_{U}| < \varepsilon$ 时, 其中 ε 为 收敛停止的门限值, 并执行循环。 3:如果问题7对于 $t_{t} = t_{s}$ 可解, 那 么: 4: 令 $t_{U} = t_{s}$, $t_{s} = \frac{t_{L} + t_{U}}{2}$ 。 5:否则: 6: 令 $t_{L} = t_{s}$, $t_{s} = \frac{t_{L} + t_{U}}{2}$

可行和不可行的值,同时得到矩阵F'。

在得到问题7的最优解F'后,可 使用高斯采样法生成秩为1的F',即 问题4的可行解^[13]。问题6可同样采 用上述方法来求解,这里不再赘述。

3 仿真结果

不失一般性,信道每条路径的 AoA和AoD相互独立。同时将360° 空间角离散化为120份,即 $\Delta \varphi = \Delta \theta =$ 3°,在波束发射时AoA与AoD均从中 选取。表1给出了系统的主要仿真参 数设置。

图 2 给出了采用蒙特卡洛仿真方 法分析卡尔曼滤波器预测精度关于 σ_x 的变化规律,其中预测精度用x的 归一化均方误差(NMSE)衡量,即

NMSE=
$$\frac{\mathbb{E}\left\{\left\|\boldsymbol{x}_{k}-\boldsymbol{x}_{k|k}\right\|_{2}^{2}\right\}}{\mathbb{E}\left\{\left\|\boldsymbol{x}_{k}\right\|_{2}^{2}\right\}} \quad \text{o in } \mathbb{E}\left\{2 \exists T\right\}$$

专题

▼表1系统主要参数设置

参数	设置值
n_t	16
n_r	16
п	1
L	3
Σ	$\sigma_x^2 I_{2L}$
R	$\sigma_v^2 I_L$
$\sigma_v^2 I_L$	$10 \lg \frac{n_r n_r}{\sigma_v^2}$
$arphi_l$	[0,π]均匀且随机选取
θ_l	[0,π]均匀且随机选取
α_l	在半径为1的复平面内均匀目随机选取
$f_{d,k}$	[0,1]均匀且随机选取





▲图2 状态向量 x的 NMSE 与 σ_x 的关系

知,随着 σ_x 的逐渐增大,x的NMSE也 在逐渐增大,同时卡尔曼滤波跟踪效 果会越来越差。随着信噪比(SNR) 接收端信号功率与接收端噪声的功 率之比的增大,NMSE也会减小。

图 3 给出了 CUSUM 检测算法的 性能仿真结果。作为对比,图 3 同时 给出了传统二元检测方法的仿真结 果。通过波束设计,接收机沿原基站 各路径的增益几乎为 0 (最大值为 0.0006435)时,而其他各方向增益之 和的最小值为 0.1。当接收机收到新 基站信号的 SNR 为 0 dB时,图 3 对比 了各个 ARL 值下两种算法所达到的 WDD 值,此处 SNR=10 log $\frac{\sigma^2}{n_i n_i \sigma_n^2}$ 。由 图 3 可以明显看出,CUSUM 算法时延



▲图3 信噪比为0 dB 时检测时延与平均运 行长度的关系

远小于二元检测算法,这验证了CU-SUM算法的有效性,即CUSUM算法 可在第一时间检测到来自新基站的 导频信号。

4 结束语

本文主要研究了高速移动情况 下的毫米波通信信道估计问题,基于 信道路径角度变化规律构建了可跟 踪预测路径角度连续变化、检测路径 角度突变的信道估计体系,以达到节 约信道估计导频量的效果。本论文 研究结果可为毫米波通信在高铁等 高速平台上的应用提供技术支持。

参考文献

- NOH G, HUI B, KIM I. High speed train communications in 5G: design elements to mitigate the impact of very high mobility [J]. IEEE wireless communications, 2020, 27(6): 98– 106. DOI:10.1109/MWC.001.2000034
- [2] YUE G R, YU D Z, CHENG L, et al. Millimeterwave system for high-speed train communications between train and trackside: system design and channel measurements [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2019, 68(12): 11746–11761. DOI:10.1109/TVT.2019.2919625
- [3] CHIU S E, RONQUILLO N, JAVIDI T. Active learning and CSI acquisition for mmWave initial alignment [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2019, 37(11): 2474– 2489. DOI:10.1109/JSAC.2019.2933967
- [4] LEE J, GIL G T, LEE Y H. Exploiting spatial sparsity for estimating channels of hybrid MIMO systems in millimeter wave communications [CI//2014 IEEE Global Communications Conference. Austin, TX, USA: IEEE, 2014: 3326–3331. DOI: 10.1109/ GLOCOM.2014.7037320
- [5] KE M L, GAO Z, WU Y P, et al. Compressive

sensing-based adaptive active user detection and channel estimation: massive access meets massive MIMO [J]. IEEE transactions on signal processing, 2020, 68: 764-779. DOI:10.1109/TSP.2020.2967175

- [6] ALKHATEEB A, AYACH OEL, LEUS G, et al. Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2014, 8(5): 831–846. DOI: 10.1109/JST– SP.2014.2334278
- [7] BAJWA W U, HAUPT J, SAYEED A M, et al. Compressed channel sensing: a new approach to estimating sparse multipath channels [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(6): 1058– 1076. DOI:10.1109/JPROC.2010.2042415
- [8] PAIVA A R L, FODOR G, FREITAS W C, et al. Kalman-filter-based tracking of millimeterwave channel parameters for V2X applications [C]//2019 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). Granada, Spain: IEEE, 2019: 1–7. DOI: 10.1109/CSCN.2019.8931350
- [9] JAIN A, SARVEPALLI P, BHASHYAM S, et al. Algorithms for change detection with sparse signals [J]. IEEE transactions on signal processing, 2020, 68: 1331–1345. DOI:10.1109/ TSP.2020.2973115
- [10] GENG J, LAI L F. Quickest change-point detection over multiple data streams via sequential observations [C]//2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Calgary, AB, Canada: IEEE, 2018: 4404–4408. DOI: 10.1109/ICASSP.2018.8461647
- [11] RISTIC B, ARULAMPALAM S, GORDON N. Beyond the Kalman filter-particle filters for tracking applications [M]. London: Artech house, 2003
- [12] KAY S M. Fundamentals of statistical signal processing [M]. London: Prentice Hall PTR, 1993
- [13] PALOMAR D P, ELDAR Y C. Eldar (Eds.). Convex optimization in signal processing and communications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010



高速铁路高架桥场景中的 复合无线信道特性



Composite Wireless Channel Characteristics for Communication Systems on Viaducts of High-Speed Railway

张逸康/ZHANG Yikang¹, 王公仆/WANG Gongpu¹, 叶如意/YE Ruyi²

(1.北京交通大学,中国北京100044;

2.中国标准化研究院,中国北京100191)

- (1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
- 2. China National Institute of Standardization, Beijing 100191, China)

摘要:高架桥场景是高铁无线通信中的重要场景之一。针对该场景下的复合信道,基于瑞利信 道模型和莱斯信道模型,对概率密度函数进行分析,推导出了两种新的概率密度函数。这不仅 丰富了高铁高架桥场景下的无线信道理论,而且对未来高铁无线通信系统设计和优化有参考 价值。

关键词:无线信道;概率密度函数;高架桥场景;高铁无线通信;复合信道

Abstract: The viaduct scenario is one of the most important scenarios in the high-speed railway (HSR) wireless communications. For the composite channel in this scenario, the probability density function is analyzed based on the Rayleigh and Rician channel models, and two new probability density functions are derived. This can enrich the wireless channel modeling theories, and contribute to the design and optimization of wireless communication networks on HSR.

Keywords: wireless channel; probability density function; viaduct scenario; HSR wireless communications; composite channel

DOI:10.12142/ZTETJ.202104007 网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/ detail/34.1228.TN.20210726.1648.004.html

网络出版日期:2021-07-27 收稿日期:2021-02-20

近着中国高铁的飞速发展,截至2019年底,高铁营业总里程已经达到3.5×10⁴ km^[1]。2019年底投运于京张高铁的智能型复兴号动车组,标志着中国率先开启了世界智能高铁的新时代和中国高铁发展的新局面^[2]。

随着人们对高铁中无线通信质 量需求的提高,越来越多的专家、学 者开始深入研究高铁无线通信系统。 高铁列车快速行驶,中国高铁沿线地 形复杂多变。这种高时速、多地形的 无线信道具有高多普勒频移、快速时 变和快速切换的特点。高铁时速的 增加给高铁无线通信带来了巨大的 挑战⁽³⁾,这些挑战具体包括如何评估 由于快时变引起的多普勒效应对系 统性能的影响,如何进行快速无线时 变信道参数估计,以及缺乏高铁场景 无线信道的实际测量和数据分析等 方面。

高架桥是一种常见的高铁场景。 例如在京沪高铁线路中,有超过70% 的场景是高架桥^[4]。与其他场景相 比,高架桥场景下的无线信道相对容 易分析处理。

人们对高铁的无线信道模型做 了一系列研究:文献[5]提出了无线信 道中新的注水算法;基于深度学习的 方法,文献[6]对信道进行了预测;文 献[7]总结并概述了高铁无线信道测 量与建模;基于5G技术,文献[8]提出 了一种新的网络切片架构;文献[9]引 入了雾计算,构建了多样的通信和雾 计算网络架构;对于智能和开放的6G 网络,文献[10]指出了关键技术,为 6G 网络的实现提出了发展方向;文献 [11]指出高铁信道模型的重要性,为 信道模型的构建提供新的方向;文献

基金项目:国家自然科学基金(U1834210、61871026、 61725101)

[12]基于高铁无线信道的快时变特性 和高多普勒频移,提出了最大后验估 计量:基于高架桥场景综合路径损 耗、小尺度衰落等一系列因素,文献 [13]提出一种能评估网络性能的新信 道模型。

但以上文献并没有给出小尺度 衰落上复合信道的概率密度函数。 本文中,我们在已有的高铁无线信道 概率密度函数的基础上,围绕高架桥 场景进行高铁的无线信道特征分析。 当无线通信系统采用数字车顶中继 时,该中继转发的信号不能等效为反 射信号,并且该场景的无线信道是瑞 利信道和莱斯信道的非线性组合。 据此,我们提出了两种新的概率密度 函数,并比较了无线通信系统在这些 不同信道模型的性能。

考虑到信道特性的研究还需要 与实测的信道特性相比较,并且目前 铁路上能做到实测的信道很少,所以 本文重点聚焦于无线信道特性,暂不 考虑系统仿真情况。

图1为高铁高架桥场景下的信号 收发模型。基站发出信号后,有两条 路径到达用户手机:一条是从基站直 接到用户手机的路径,另一条是从基 站经高铁天线转发到用户手机的路 径。其中,为了简化计算,信道h₁和 h2假定服从瑞利分布。因为如果用 含有直射路径的信道,也就是如果用 莱斯信道进行建模,那么计算会非常 复杂。如表1所示,瑞利信道是莱斯 信道的特例,而信道f。假定服从莱斯 分布。

根据修正的贝塞尔方程可知,表 2中第1类、第2类修正的0阶贝塞尔 函数分别为[14]:

$$I_0(z) = \left(\frac{z}{2}\right)^{\nu} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{z^2}{4}\right)^k}{k! \Gamma(\nu+k+1)} , \quad (1)$$

$$K_0(z) = \frac{\pi}{2} \frac{I_{-\nu}(z) - I_{\nu}(z)}{\sin(\nu\pi)} \quad (2)$$

1无线信道概率密度函数分析

1.1 高铁无线信道常用概率密度函数

当前,在高铁无线信道特性研究

专题

中,信道模型常用的概率密度函数[15] 列举如下,高斯信道的概率密度函 数为:

张逸康 等

$$p(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(f-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\},$$
 (3)



▲图1 高铁高架桥场景中的信号收发模型

▼表1 高铁无线信道模型

莱斯 <i>K</i> 因子	信道模型
К=0	瑞利信道
0 <i><k<< i="">∞</k<<></i>	莱斯信道
K=∞	高斯信道
▼表2 符号说明	
字母	定义
p(f)	f的概率密度函数
$p(f_0)$	f_0 的概率密度函数
$p(h_1)$	h_1 的概率密度函数
$p(h_2)$	h_2 的概率密度函数
p(h)	h的概率密度函数
p(g)	g的概率密度函数
$I_0(z)$	第1类修正的0阶贝塞尔函数
$K_0(z)$	第2类修正的0阶贝塞尔函数
$A \ \mu$	直射分量幅度 均值
$\sigma_0^2, \ \sigma_1^2, \ \sigma_2^2$	f_0 、 h_1 、 h_2 随机变量的方差
c	衰减因子
œ	表示无穷大
f:任意的随机变量 f_o:从基站到用户端的直射信道的随机变量 g:f_a和h的复合信道的随机变量	$h:h_1 \pi h_2$ 的复合信道的随机变量 $h_1:$ 从基站到车顶天线信道的随机变量 $h_2:$ 从车顶天线到用户信道的随机变量

h₂:从车顶天线到用户信道的随机变量

瑞利信道的概率密度函数为:

$$p(f) = \frac{f}{\sigma_0^2} \exp\left\{-\frac{f^2}{2\sigma_0^2}\right\},\tag{4}$$

11.11.0.13.337.14

莱斯信道的 PDF 为:

$$p(f) = \frac{f}{\sigma_0^2} exp\left\{\frac{-(f^2 + A^2)}{2\sigma_0^2}\right\} I_0 \left[\frac{fA}{\sigma_0^2}\right]_{\circ}$$
(5)

其中,高斯信道模型可以看成信号与 高斯白噪声的叠加;瑞利信道表示不 含直射分量的小尺度衰落;莱斯信道 表示含直射分量的小尺度衰落。小 尺度衰落指的是信号在短时间或短 距离传播后幅度、相位或多径时延快 速变化,波动发生在大约一个波长范 围内。

1.2 复合无线信道概率密度函数

如图1所示,高架桥无线复合信 为 : $g = f_0 + c \times h_1 \times h_{2^\circ}$ 道 随机变量 f_0 、 h_1 和 h_2 的概率密度函数 $p(f_0), p(h_1) 和 p(h_2)$ 如公式(6)—(8) 所示。 $h = c \times h_1 \times h_2$,则 $g = f_0 + h_0$ 为了计算g的概率密度函数p(g),需 要首先计算h的概率密度函数p(h)。 以下为推导过程:

$$p(f_0) = \frac{f_0}{\sigma_0^2} \exp\left\{\frac{-(f_0^2 + A^2)}{2\sigma_0^2}\right\} I_0\left[\frac{f_0 A}{\sigma_0^2}\right],$$
(6)

$$p(h_1) = \frac{h_1}{\sigma_1^2} \exp\left\{-\frac{h_1^2}{2\sigma_1^2}\right\},$$
 (7)

$$p(\mathbf{h}_2) = \frac{\mathbf{h}_2}{\sigma_2^2} \exp\left\{-\frac{\mathbf{h}_2^2}{2\sigma_2^2}\right\} \circ$$
(8)

首先,当衰减因子c=1时,我们 计算h的概率密度函数。因为随机变 量h₁和h,为两个服从瑞利分布的相 互独立的随机变量,所以随机变量 h_1 和h,的乘积 h的概率密度为:

$$p(h) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|h_1|} p\left(h_1, \frac{h}{h_1}\right) dh_1 =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|h_1|} p\left(h_1\right) p\left(\frac{h}{h_1}\right) dh_1 =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|h_1|} \frac{h_1}{\sigma_1^2} \exp\left\{-\frac{h_1^2}{2\sigma_1^2}\right\} \frac{h}{\sigma_2^2} \exp\left\{-\frac{h^2}{2\sigma_2^2h_1^2}\right\} dh_1 =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|h_1|} \frac{h}{\sigma_1^2 \sigma_2^2} \exp\left\{-\frac{h_1^2}{2\sigma_1^2}\right\} \exp\left\{-\frac{h^2}{2\sigma_1^2}\right\} \exp\left\{-\frac{h^2}{2\sigma_1^2}\right\} dh_1 =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|h_1|} \frac{h}{\sigma_1^2 \sigma_2^2} \exp\left\{-\frac{h_1^2}{2\sigma_1^2} - \frac{h^2}{2\sigma_2^2 h_1^2}\right\} dh_{1,0}$$
(9)

由于被积函数是h1的偶函数,我 们将式(9)简化为:

$$p(h) = 2 \int_{0}^{+\infty} \frac{1}{h_{1}} \frac{h}{\sigma_{1}^{2} \sigma_{2}^{2}} \exp\left\{-\frac{h_{1}^{2}}{2\sigma_{1}^{2}} - \frac{h^{2}}{2\sigma_{2}^{2} h_{1}^{2}}\right\} dh_{1} = \frac{2h}{\sigma_{1}^{2} \sigma_{2}^{2}} \int_{0}^{+\infty} \frac{1}{h_{1}} \exp\left\{-\frac{h_{1}^{2}}{2\sigma_{1}^{2}} - \frac{h^{2}}{2\sigma_{2}^{2} h_{1}^{2}}\right\} dh_{1} \circ$$
(10)

再令
$$\frac{h_1^2}{2\sigma_1^2} = v$$
,式(9)又可以进

一步化简为:

$$p(h) = \frac{h}{\sigma_1^{2} \sigma_2^{2}} \int_{0}^{+\infty} \frac{1}{v} \exp\left\{-v - \frac{h^2}{4\sigma_1^{2} \sigma_2^{2} v}\right\} dv = \frac{h}{v}$$

$$\frac{2h}{\sigma_1^2 \sigma_2^2} K_0 \left(\frac{|h|}{\sigma_1 \sigma_2} \right) \circ$$
(11)

对于不为1的衰减因子,可以 得到:

$$p(h) = \frac{2h}{c^2 \sigma_1^2 \sigma_2^2} K_0 \left(\frac{|h|}{c \sigma_1 \sigma_2}\right) \quad 0 < c < \infty_o$$

$$(12)$$

因为随机变量 f_0, h_1, h_2 相互独 立,所以 f_0 与h也相互独立。那么,随 机变量 f_0 与h之和g的概率密度函 数为:

$$p(g) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(g - h) p(h) dh =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{g-h}{\sigma_0^2} exp\left\{\frac{-\left(\left(g-h\right)^2+\beta^2\right)}{2\sigma_0^2}\right\}$$
$$I_0\left[\frac{\left(g-h\right)\beta}{\sigma_0^2}\right]p(h)dh_{\circ}$$
(13)

2 MATLAB 仿真及参数分析

2.1 概率密度函数比较

概率密度函数的仿真参数具体 如表3所示。

通过 MATLAB 仿真, 可以得到 f_0 、 h_1 、 h_2 、h和g的概率密度曲线,如 图2所示。

▼表3 仿真参数

参数	取值或函数
方差 σ_0^2 、 σ_1^2 、 σ_2^2 直射分量幅度 A	均为2 1
第1类修正的0阶贝塞尔函数	besseli()函数
第2类修正的0阶贝塞尔函数	besselk()函数
仿真结果表明,f₀、h₁、h₂、h和g 的概率密度均先增大后减小最后 趋于0。

瑞利分布的概率密度曲线在 MATLAB中有专门的函数,但是莱斯 分布、信道h和信道g服从的分布没 有专门的函数。其中,随机变量g的 概率密度函数仍是一个积分函数,由 于推导闭合解比较复杂,所以本文通 过利用 MATLAB 中 f₀ 与 h 的卷积运 算,并利用其中的 conv()函数得到g概 率密度函数的数值解。

2.2 参数分析

2.2.1 方差分析

信号强度的总平均损耗是与距离相关的,可用P(d)这一函数来表示。一般地, $P(d) \propto \frac{1}{d^n}$,对于高架桥场景,n的典型值为4,也就是说接收信号的功率与收发天线距离的四次方成反比^[15]。

$$P(d) \propto \frac{1}{d^4} \,^{\circ} \tag{14}$$

可以看出,随着距离的增加,衰减功率越大,方差也就越大,所以:

$$\sigma_0^2 \propto \frac{1}{d^4}, \sigma_1^2 \propto \frac{1}{d^4}, \sigma_2^2 \propto \frac{1}{d^4}, \qquad (15)$$

其中, σ_0^2 、 σ_1^2 、 σ_2^2 分别对应 f_0 、 h_1 、 h_2 随机变量的方差。设 $\sigma_0^2 = \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 2$,则满足 $\sigma_0^2 < \sigma_1^2 + \sigma_2^2$ (考虑车体损耗)。

总体信道为 $g = f_0 + h, f_0 与 h$ 相 互独立,则有:

$$Var(g) = Var(f_0) + Var(h), \qquad (16)$$

其中, Var(g)表示变量 g 的方差, $Var(f_0)$ 与 Var(h)同理。

2.2.2 c 对复合信道的影响

由于不同路径下的衰减程度不同,下面我们将讨论 c 对复合信道特性的影响。

对于总信道 $g = f_0 + c \times h_1 \times h_2$ 来说,不同的c会有不同的信道曲线。 我们分别取c为1、0.7、0.3来计算总 信道,具体如图3所示。

信道特性会受到衰减因子的影

响,因此需要人 们针对不同c来 分析复合概率 密度函数 p(g)。

由图3可以 得出:随着 c 的 减小,在随机变 量值越小的地 方概率密度越 大;在随机变量 值越大的地方 概率密度越小。

2.2.3 BER分析

将一个随 机比特序列作 为发送信号并 记为x(n),通过 f₀和g的两个信 道后的信号与 噪声信号 w(n) 线性叠加,得到 接收信号 $y_1(n) = f_0 x(n) +$ w(n)与 $y_2(n) =$ $gx(n) + w(n)_{\circ}$ 在理想情况下, 假设接收方已 知信道f₀和g, 根据接收信号 $y_1(n)$ 和 $y_2(n)$, 利用最大似然

准则就可以检测出x(n)。检测方案 如下:根据最大似然准则实现最佳接 收,在发送信号0、1 先验概率相等的 情 况 下 ,使 得 似 然 函 数 $P(y(t)|s_i(t)), i = 1,2$ 最大。其中, $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 分别表示发送1和发送0,y(t)为接收信号。记 $s_1(n)$ 对应星座图中 的发送信号点为 $(a_1,b_1), s_2(t)$ 对应星









座图中的发送信号点为(a₂,b₂)。

在噪声服从高斯分布的前提下, 似然函数最大化与星座点距离最小 化是等价的,所以最大似然准则就可 以转化为最小距离准则。这样利用 相关接收机就可以根据信号点之间 的距离进行抽样判决,实现最佳 接收。

假设信号采用的调制方式是二 进制相移键控(2PSK),发送1码和0 码的信号能量均为 E_b ,于是信号可以 表示为 $s_1 = (\sqrt{E_b}), s_2 = (-\sqrt{E_b})_o$

根据相关接收抽样判决的规则^[16],可以得到:



 $0,则判为s_2(t)_{\circ}$

考虑到高铁车体的损耗经验值 为 20 dB^[17],则可以根据接收信号 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 的错误比特数量与发送 信号x(t)比特总数的占比来计算错 误比特率。对于 c=1、c=0.1,则可利 用MATLAB仿真,具体如图4(a)。

为了清晰地说明车体损耗会对 直射信道 h 和复合信道 g 产生很大影 响,当车体损耗为 10 dB 时,不同车体 损耗下误比特率(BER)特性曲线具 体如图 4(b)所示。如图可知,当车体 损耗衰减值越小时,直射信道 f₀ 和复 合信道 g 的 BER 特性越接近。

从图 4(a)和图 4(b)可以看出,由 于直射信道 f₀的概率密度函数与 c 无 关,所以 c=1、c=0.1 时的曲线重合。 信道的 BER 曲线近似为直线,且随着 信噪比(SNR)的增加,BER 逐渐减 小。信道的斜率近似相等,也就是说 它们的变化速率近似相等。根据推 导的结果可知,误比特率的理论值约 为 1/4SNR^[18],所以 BER 与 SNR 成反 比衰减。

当SNR在0~20dB范围内时,由

于信道g的概率密度函数与c有关, 那么对于c=1、c=0.1,在相同的 SNR 条件下,c越小,BER 就越小。然而由 于考虑了直射信道的车体损耗,即便 c=0.1,也不能看作是直射信道。在相 同的 SNR 条件下,直射信道 f_0 的 BER 要大于复合信道g的 BER。这可以说 明,直射信道 f_0 比复合信道g出错的 概率会更大。也就是说,在考虑高铁 的车体损耗的条件下,复合信道g要 优于直射信道 f_0 。

3 结束语

本文中,我们不仅总结了高铁中 高架桥无线信道的基本概率密度函 数,也得到了两种新的概率密度函数 的闭合解。通过MATLAB仿真,比较 了直射路径与非直射路径下信道的 概率密度函数曲线,并验证了理论推 导的正确性。另外,在相同SNR条件 下,当直射信道考虑车体损耗,复合 信道g的可靠性要优于直射信道f₀。 综上所述,本文丰富了高铁高架桥场 景下的无线信道理论,对未来高铁无 线通信系统设计和优化有参考价值。



▲图4 不同车体损耗下BER特性曲线对比

专题

张逸康 等

高速铁路高架桥场景中的复合无线信道特性 ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

参考文献

- [1] 訾谦. 3.5万 km: 中国高铁的新跨度 [J]. 城市轨 道交通研究, 2019, (12): 6
- [2] 刘志如. 京张高速铁路门式墩方案设计优化及施工技术研究[J]. 科技与创新, 2020(4): 105-107
- [3] AI B, CHENG X, KURNER T. Challenges toward wireless communications for highspeed railway [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2014, 15(5): 2143–2158. DOI: 10.1109/TITS.2014.2310771
- [4] 王熙宇. 高铁无线通信系统的快时变信道估计 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018
- [5] XING C, JING Y, WANG S, et al. New viewpoint and algorithms for water-filling solutions in wireless communications [J]. IEEE transactions on signal processing, 2020, 68: 1618–1634. DOI: 10.1109/TSP.2020.2973488
- [6] YANG Y, GAO F, LI G Y, et al. Deep learningbased downlink channel prediction for FDD massive MIMO system [J]. IEEE communications letters, 2019, 23(11): 1994–1998. DOI: 10.1109/LCOMM.2019.2934851
- [7] 刘留, 陶成, 陈后金, 等. 高速铁路无线传播信道 测量与建模综述 [J]. 通信学报, 2014, (1): 115-127
- [8] 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
- [9] ZHOU Y, TIAN L, LIU L, et al. Fog computing enabled future mobile communication networks: a convergence of communication and computing [J]. IEEE communications magazine, 2019, 57(5): 20–27. DOI: 10.1109/

←上接第17页

信号与发射信号相干叠加。仿真结 果表明,采用IRS辅助后,等效信道的 信道增益随时间波动幅度小且更加 平缓,误比特率性能得到较大提升, 能够较好地提高了高铁通信系统性 能,减少信道快衰落影响。

参考文献

- [1] 刘留, 陶成, 余立, 等. 高速铁路无线信道测量与 信道模型探讨 [J]. 电信科学, 2011, 27(5): 54-60. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0801.2011.05.014
- [2] WU Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network [J]. IEEE communications magazine, 2020, 58(1): 106–112. DOI: 10.1109/ MCOM.001.1900107
- [3] CUI T J, MEI Q Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programming metamaterials [J]. Light: science & applications, 2014, 3(10): e218. DOI: 10.1038/ lsa.2014.99
- [4] BASAR E, AKYILDIZ I F. Reconfigurable intel-

MCOM.2019.1800235

- [10] ZHOU Y, LIU L, WANG L, et al. Serviceaware 6G: an intelligent and open network based on the convergence of communication, computing and caching [J]. Digital communications and networks, 2020, 6(3): 253– 260. DOI: 10.1016/j.dcan.2020.05.003
- [11] ZHOU T, LI H, WANG Y, et al. Channel modeling for future high-speed railway communication systems: a survey [J]. IEEE access, 2019, 7: 52818–52826. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2912408
- [12] HOU Z, ZHOU Y, TIAN L, et al. Radio environment map-aided doppler shift estimation in LTE railway [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2017, 66(5): 4462–4467. DOI: 10.1109/TVT.2016.2599558
- [13] HE R, ZHONG Z, AI B, et al. Measurements and analysis of propagation channels in high–speed railway viaducts [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2013, 12(2): 794–805. DOI: 10.1109/TWC.2012.120412.120268
- [14] AMOS D E. A portable package for Bessel functions of a complex argument and nonnegative order [J]. Transactions on mathematical software, 1986, 12(3):265–273
- [15] MOLISH A F. 无线通信(第二版) [M]. 北京: 电 子工业出版社, 2018
- [16] 樊昌信, 曹丽娜 . 通信原理(第7版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2020
- [17] 元嘉. 高速铁路场景下无线中继通信系统信息 传输可靠性与安全性研究 [D]. 北京: 北京交通 大学, 2018
- [18] VISWANATH D T P. 无线通信基础 [M]. 北 京: 人民邮电出版社, 2007

ligent surfaces for Doppler effect and multipath fading mitigation [EB/OL]. (2019–12– 09) [2021–06–03]. https://arxiv. org/abs/ 1912.04080

- [5] HUANG Z, ZHENG B, ZHANG R. Transforming fading channel from fast to slow: IRS-assisted high-mobility communication [EB/OL]. (2020-11-06)[2021-06-02]. https://arxiv.org/ abs/2011.03147
- [6] 刘留, 陶成, 陈后金, 等. 高速铁路无线传播信道 测量与建模综述 [J]. 通信学报, 2014, 35(1): 115–127. DOI: 10.3969/j.issn.1000–436x.201 4.01.014
- [7] YING D, WOOK F W, THOMAS T A, et al. Kronecker product correlation model and limited feedback codebook design in a 3D channel model [C]//2014 IEEE International Conference on Communications (ICC). Sydney, NSW, Australia: IEEE, 2014:5865–5870. DOI: 10.1109/ICC.2014.6884258
- [8] QIN Q, GUI L, PENG C, et al. Time-varying channel estimation for millimeter wave multi-user MI-MO systems [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2018, 67(10): 9435–9448. DOI: 10.1109/TVT.2018.2854735
- [9] TANG W, CHEN M Z, CHEN X, et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: path loss modeling and experimental measurement [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2020, 20(1): 421–439. DOI: 10.1109/TWC.2020.3024887
- [10] WU Q, ZHANG S, ZHENG B, et al. Intelligent reflecting surface aided wireless communications: a tutorial [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(5): 3313–3351. DOI: 10.1109/ TCOMM.2021.3051897



项目等60余项;发表论文300余篇,获得发 明专利40余项。

司重大、重点科技研发

智能超表面技术在智能高铁 通信场景的应用探讨

Applications of Reconfigurable Intelligent Surface in Smart High-Speed Railway Communications

赵亚军 /ZHAO Yajun^{1,2}, 章嘉懿 /ZHANG Jiayi³, 艾渤 /AI Bo³

- (1. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室,中国 深圳 518057;
- 2. 中兴通讯股份有限公司,中国 深圳 518057; 3. 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)
- (1. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518057, China;

2. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;

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

摘要:作为最具发展潜力的5G-Adv和6G关键技术之一,智能超表面(RIS)技术具有低成本、 低复杂度和易于部署等特点,为智能高铁通信的发展提供了新契机。介绍了 RIS 辅助的智能高 铁通信的典型应用,包括抑制多普勒频移效应、解决频繁切换问题、克服高穿透损耗问题和支 持高精度列车定位。深入讨论了 RIS 辅助的智能高铁通信中的关键技术,包括信道测量与建模、 信道估计与反馈、波束赋形、网络架构与部署。认为智能高铁新基建与 RIS 构建的电磁新基建 的结合,将会给智能高铁带来广阔的前景。

关键词: 智能高铁; 智能超表面; 多普勒频移; 穿透损耗; 列车定位; 信道估计; 波束赋形

Abstract: Reconfigurable intelligent surface (RIS) is one of the most promising technologies for 5G-Adv and 6G. It has the characteristics of low cost, low complexity, and easy deployment, which provides a new opportunity to develop intelligent high-speed railway communications. The typical applications of RIS-assisted smart high-speed railway communications are introduced in detail, including suppressing the Doppler shift effect, solving frequent handoff problems, overcoming high penetration loss problems, and supporting high-precision train positioning. The key technologies of RIS-assisted smart high-speed railway communications are discussed in-depth, including channel measurement and modeling, channel estimation and feedback, beamforming, network architecture, and network deployment. It is believed that the combination of the new intelligent high-speed railway infrastructure and the new electromagnetic infrastructure built by RIS will bring broad industrial prospects to the intelligent high-speed railway in the future.

Keywords: smart high-speed railway; reconfigurable intelligent surface; Doppler frequency shift; penetration loss; train positioning; channel estimation; beamforming

DOI: 10.12142/ZTETJ.202104008 网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/ detail/34.1228.TN.20210726.1647.002.html

网络出版日期: 2021-07-26 收稿日期: 2021-06-25

10年来,随着高铁的迅速发展、 **儿**移动通信技术以及人工智能 (AI) 技术的进步与融合, 高铁已开 始从信息化向智能化演进。5G网络天 然支持万物互联,因此它的规模商用

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1807600)

将会加快高铁智能化的发展。5G技术 可以使智能高铁通信更加"高速"和"智 能"。但智能高铁通信的工程实现仍 极具挑战。

作为一个全新的技术,智能超表 面(RIS)技术一经出现就引起了业 界的广泛关注。近两年, RIS 在学术 研究及产业推进上发展迅速, 被普遍 认为是未来移动通信网络的关键候选 技术之一[1-2]。

RIS 通常由大量精心设计的电磁 单元排列组成,通过给电磁单元上的 可调元件施加控制信号,动态控制这 些电磁单元的电磁性质,进而以可编



赵亚军 等

程的方式对空间电磁波进行智能调控,并形成幅度、相位、极化和频率可控制的电磁场。作为超材料的二维实现,RIS 天然具有低成本、低复杂度,以及易部署的突出特性,可以更好地应对智能高铁通信场景所带来的挑战。

RIS 技术在经典场景下的无线通 信应用研究非常多,但其在高铁通信 应用的系统探讨还很少^[3],也仅有少 量文献涉及该场景中的单点技术问题。 例如,文献 [3] 提供了采用 RIS 降低多 普勒效应的思路。

1 智能高铁移动通信需求与挑战

智能高铁移动通信技术的主要研 究内容包括宽带移动通信、车载无线 通信、智能调度通信、车 - 地 / 车 -车通信技术等,用于支持智能高铁移 动通信场景下的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等四 大类典型业务^[5]。

相对于经典的通信场景,智能高 铁无线通信由于其无线传播环境及业 务特点,目前面临诸多严峻挑战,主 要包括: (1)高铁的超高速移动所带 来的严重的多普勒频移与频繁的小区 切换问题; (2) 高铁车厢的高穿透损 耗使得车厢内的信号覆盖改善较为困 难; (3)需要充分利用更多的频段(包 括6GHz以下频段、毫米波频段), 以更好地满足未来智能高无线铁通信 需求,因此要求无线网络具备支持多 频段的能力; (4)智能高铁无线通信 网络可以采用专网覆盖或公网覆盖, 因此面临与铁路沿线的周边网络之间 复杂的异系统共存问题; (5) 其他一 些问题,例如高速移动带来的信道估 计与反馈、列车高精度定位与环境感 知问题,以及智能高铁通信中的多业 务类型的共存等。

为解决上述问题,传统高铁无线 通信系统主要采用优化收发端算法、 优化收发机的网络部署等方法。例如, 采用分布式大规模天线技术、发射端 多普勒估计与预补偿技术及切换流程 优化技术等。这些传统方法系统复杂 度高、网络部署及优化难度大,而且 实现成本高。

另外,虽然业界有很多关于 AI 用 于增强传统无线通信系统的研究,但 这些研究主要探讨的是发射端与接收 端的智能化,无线信道依然需要被动 适应自然传播环境。智能高铁无线通 信挑战的根源在于其复杂的无线信道 环境,若能人为控制无线传播环境, 就能从根本上消除高铁通信特有的复 杂信道环境。在实现无线系统收、发 端智能化基础上,进一步实现无线信 道的智能可控,能构建真正涵盖发射 端、无线信道和接收端的端到端智能 无线系统。

综上所述,传统高铁无线通信解 决方案只能被动地适应高铁的信道特 性。RIS 的出现让人们可以对无线传 播环境进行调控,构建智能可控的无 线传播环境,从而可以对收发端和无 线传播信道进行联合优化,为进一步 提升系统性能、降低复杂度与成本提 供可能。

2 RIS 使能智能高铁无线通信的 典型应用

目前,智能高铁无线通信仍面临 诸多挑战,但同时也存在着显著的规 律性。例如,无线信道体现为沿铁路 线呈规律性变化;列车上的用户终端 (UE)组整体迁移,具备显著共性, 包括 UE 组整体移动的群切换、业务 连接及容量需求的整体迁移等。基于 这些特征,可以针对性地对基于 RIS 的智能高铁无线通信算法与网络部署 进行设计。

2.1 抑制多普勒效应

在高铁场景中,列车速度远高于 一般终端的速度,因此它的多普勒频 移与扩展更加严重。另一个严重的问 题是,列车通过基站时会发生多普勒 频移从 +f_{max} 到 -f_{max} 的正负跳变,该突 发的多普勒频移正负跳变会导致接收 端难以进行准确的频移补偿。严重的 多普勒效应是高铁信道传播的典型特 性之一。

RIS 对无线信号传播幅度与相位 的动态调控为解决高铁场景严重的多 普勒频移问题提供了机会。实时可调 的 RIS 可以有效降低由多普勒效应引 起的接收信号强度的快速波动^[6-7]。 高铁无线通信场景确定的运行方向和 规则的运行轨迹会产生规则的、可预 测的多普勒频移曲线,从而使得收发 端易于跟踪,同时易于补偿多普勒效 应^[2]。多普勒频移的影响主要在于, 不同多径信号分量达到接收机的多普 勒频移有所差异且动态变化。高铁沿 线无线通信信道的主散射体较为规则 且相对确定,因此可以在一些关键主 散射体表面部署 RIS,并基于测量及 预测调控不同多径的多普勒频移对 齐,从而减少多普勒频移的影响。

有两种特殊场景需要专门进行优 化:高铁临近 RIS,但车体处于 RIS 的单侧;列车经过 RIS,车体前后车 厢分别位于车厢的两侧。

(1)对于高铁临近 RIS 的场景, 相对于该 RIS,不同部位的车厢有不 同的角度,因而有不同的多普勒频移。 可以将 RIS 反射表面进行分块,不同 子块的天线阵元对入射其上的信号分 别独立地进行波束赋形,以对齐不同 列车部位的车厢,并针对性地调控以 补偿不同的多普勒频移量。

(2) 对于列车经过 RIS 的场景, 若 RIS 同时服务两侧车厢,会存在上 述的多普勒频移正负跳变效应。为减 少该效应的影响,一种可选的方案是 采用列车行进方向的 RIS 来服务列车 前段的车厢,而列车正在经过的 RIS 仅服务单侧车厢,从而避免多普勒频 率跳变问题。RIS 简单、易部署,且 成本较低,可以在铁路沿线进行更为 密集的部署,因此为上述方案提供了 可能性。

2.2 解决频繁切换问题

高铁 350 km/h 以上的移动速度 会引起频繁的小区切换,这可能造成 网络的吞吐量下降、业务中断概率提 升等问题,从而影响用户的高铁通信 体验。

目前,有两个方案可以解决频繁 切换问题:(1)采用射频拉远模块 (RRU)或分布式天线,扩展小区的 覆盖范围,从而降低切换频率;(2) 优化小区间切换流程,尽可能减少因 频繁切换引起的性能变化。第1类方 案为主要的解决方案,但它需要部署 更多的 RRU或分布式天线。而 RRU 或分布式天线的价格较高、体积重量 较大、功耗较高,并且需要较多的宽 带回传链路等,因此该方案在站址选 择、回传链路部署、供电等方面均面 临很大的挑战。

基于自身的技术特性, RIS 有 3 种方式替代或改进传统解决方案:

(1)使用低成本的反射型 RIS 完 全替换传统的分布式天线节点,并延 伸覆盖线路长度,从而降低小区的切 换频次。反射模式的 RIS 进一步分为 无源反射 RIS 和有源反射 RIS 两个子 类。对于无源反射 RIS,可以通过 RIS 波束赋形增益增强信号,扩展覆盖范 围。无源反射 RIS具有成本低、功耗小、 简单、易部署的优点。仅依靠波束赋 形增益,并不能放大信号幅度,因此 覆盖扩展范围有限。有源反射 RIS 可 以放大反射信号,因此可以进一步扩 展覆盖范围。有源反射 RIS 对成本、 复杂度、部署等方面有更高要求。相 对于传统的分布式天线方案,两种反 射模式的 RIS 在各方面的要求均有大 幅度降低。

赵亚军 等

(2)将传统分布式天线与 RIS 结合。考虑到 RIS 覆盖扩展范围受限, 那么可以在一定程度上降低分布式天 线的部署密度,并且采用 RIS 来增强 覆盖。

(3)采用透射型 RIS 来改进 传统大规模多输入多输出(Massive MIMO)天线,即采用无源透射型 RIS 来替换传统有源相控阵天线,从而减 少天线的体积、重量,并且降低功耗 以及成本。另外,采用无源透射型 RIS 替换传统有源相控阵天线,有利于制 作一些异形天线,从而更好地满足高 铁沿线不同自然条件下的部署需求。 例如,对于半圆柱曲面形态,波束覆 盖角度可以更好地对准处于不同角度 的列车。

另外,高铁通信的业务需求会随 着高铁运动进行整体迁移。也就是说, 只有高铁经过的小区才需要进行业务 连接;在本次列车经过后至下一趟列 车到达前,该小区不需要支持高铁通 信。那么,铁路沿线的相邻基站(NB_{*} 与 NB₄₊₁)可以接力共享两者之间的 RIS,从而尽可能地降低覆盖成本。传 统的相邻两个基站在共享拉远 RRU 或 分布式天线时,由于需要低时延地切 换大带宽的业务数据及控制信令,因 此实现复杂度较高;而共享 RIS 仅需 要在基站间切换低带宽控制信令,其 时延要求可以适度降低,从而使 RIS 在动态性与共享切换的实时性之间取 得平衡。

2.3 克服高穿透损耗

高铁穿透损耗包括两种情况:列 车金属车厢穿透损耗和列车窗玻璃穿 透损耗。本节中,我们首先对两类穿 透损耗进行分析,然后讨论不同的解 决方案。

2.3.1 穿透损耗分析

(1) 金属车厢

高铁的金属车厢会带来严重的穿透损耗,这使车厢内的信号覆盖面临 严峻挑战。文献[8]给出了几种典型车 型的穿透损耗参考值,其中CRH3车 型的损耗值更高,为24~26 dB(见表1)。 另外,对于同一车型,不同信号人射 角也会对应不同的穿透损耗。当无线 信号垂直入射车厢时,相应的穿透损 耗最小;相反,无线信号的入射角越小, 穿透损耗越大。因此,当基站离铁道 越近,覆盖区域边缘信号进入车厢的 入射角就会越小,穿透损耗会越大。 因此,合理地控制入射角,能够更好 地满足高速轨道覆盖目标。

(2) 玻璃窗

列车车窗玻璃的穿透损耗比金属车 厢低,但由于防冲撞等特殊的需求,一 般常采用特殊材料的双层玻璃。因此, 列车车窗玻璃穿透损耗不可忽略,尤其 是毫米波,穿透损耗明显。文献[9]给 出了几种典型玻璃在28 GHz 频段的穿透 损耗值,例如透明玻璃(3.6~3.9 dB)、

▼表1 高铁常用列车车型及信号的穿透损耗情况(频点: 1.8 GHz)

车型	列车材质	损耗参考值 /dB	
普通列车	铁质	12~15	
CRH1(龙巴迪列车)	不锈钢	20~24	
CRH2(部分动车)	中空铝合金车体	14~16	
CRH3(京津城际)	铝合金车体	24~26	
CRH5(阿尔斯通)	中空铝合金车体	22~24	

有色玻璃(24.5~40 dB)。另外, 玻璃 车窗的面积相对较小,信号入射能量 受限。与金属车厢类似,车窗玻璃的 穿透损耗同样受到信号入射角度的影 响。文献[10]提供的测量结果显示, 穿透损耗随着信号入射角度的增大而 增大。但是,该文献中的测量结果也 表明,不同极化方向信号随入射角度 的变化呈现较大差异。其中,垂直极 化信号的透射系数随着入射角度增大 而线性降低;而水平极化信号在不同 入射角时,透射系数基本保持稳定。 这种现象给了我们新的启示:既然不 同极化方向的信号在不同入射角度下 有着不同的穿透损耗变化,那么我们 可以利用这一现象来减少穿透损耗的 影响。例如,可以考虑采用对入射角 不敏感的水平极化方向的信号来穿透 车窗玻璃。

2.3.2 RIS 克服穿透损耗

实现高铁车厢无线移动网络内部 覆盖主要有两种模式:铁路沿线节点 的信号直接穿透列车金属和车窗玻璃 进入车厢,但这样存在严重的穿透损 耗;在列车上部署移动节点,例如车 载中继或客户前置设备(CPE),这 就需要在车厢顶部进行开孔部署以接 收天线,从而把信号引入车厢内部。 针对上述两种模式,RIS 有不同的解 决方案,下面我们将分别探讨。

(1)车窗玻璃布置透明形态 RIS 列车车窗尺寸受限,铁路沿线通 信节点的波束(尤其是毫米波频段) 容易被金属车厢阻挡。另外,信号经 过车窗玻璃时也会有较大的穿透损耗。 在不改变高铁车厢布局的前提下,在 每个车窗布置透明形态的 RIS,能够 实现对车厢外信号的有效增强及覆盖。 若 RIS 动态可调,则可以对其进行实 时调控以跟踪覆盖车厢内不同角度的 用户,从而解决波束阻挡问题,并获 得波束赋形增益;对于简化的固定权 值RIS,可以为其设计宽波束调控权值, 以解决波束阻挡问题,但并不能获得 波束赋形增益。当然,也可以考虑在 车厢内部同时部署RIS,辅助车窗透 明RIS调控波束覆盖。这样,可以克 服上述固定权值透明RIS的弊端。需 要注意的是,透明形态的RIS设计须 同时兼顾信号增强和可见光透明度的 问题。

(2) 铁路沿线部署 RIS

在不增加基站密度的前提下,在 铁路沿线合理部署 RIS,可以在一定 程度上缓解列车穿透损耗问题。首先, 利用 RIS 简单、易部署的特点,可以 在铁路沿线更多地部署 RIS 以增强基 站信号,降低大尺度路损。其次,可 以利用超大规模 RIS 天线阵元提升波 束赋形增益,以更好地对齐车窗入射。 另外,有些窗玻璃穿透损耗对入射信 号的极化方式比较敏感。基于此特性, RIS 可以调控入射信号的极化方向, 从而减少入射角对车窗玻璃穿透损耗 的影响。如 2.3.1 节所述, 垂直极化信 号透射系数随着入射角度增大而线性 降低; 而水平极化信号在不同入射角 时,透射系数基本保持稳定。那么, 我们完全可以考虑利用铁路沿线部署 的 RIS 调控信号极化方向,把入射到 车窗的信号调控为水平极化方向,从 而降低在大入射角下的车窗玻璃穿透 损耗。

(3) 增强现有车顶天线

尽管采用车载中继或者 CPE 把信 号引入/引出车厢是解决高铁通信的 有效手段,但是部署传统有源车顶天 线仍然具有很大的挑战。作为亚波长 无源二维超表面,RIS 便于设计成多 样的形态,用于增强现有的车顶天线, 并克服传统有源天线的弊端。例如, RIS 可以贴附于车顶表面,安装便利, 且不会改变车厢表面的形态。另外, RIS 这种贴附于车顶表面的形态,有 利于更大规模的部署,以提供更高的 天线增益。

(4)车厢内壁部署 RIS

在车厢内壁进一步部署 RIS,可 更好地调控车内传播信道,解决车座 阻挡问题。例如,在车厢内表面部署 RIS或用其他合适的固定装饰来部署 RIS。这些 RIS 能够对透射进入车厢的 有限强度的信号进行精细调控,以对 齐目标 UE,从而充分利用进入车厢内 部的信号能量。一般来说,车厢内的 终端移动速度较慢,或者是几乎相对 静止(如物联网终端)。RIS-UE 之间 为慢变信道,更易于进行信道估计以 及波束跟踪。

2.4 支持列车高精度定位

列车定位技术可以随时随地获得 列车地理位置、实时速度等信息,是 实现行车调度与控制的智能化基础。 5G 技术的最新进展,尤其是亚米定位 精度的特定要求,使得基于无线网络 的定位成为未来列车定位系统的一个 重要技术选择^[11]。RIS 具有超大规模 天线阵元、超大天线孔径的特点,可 以提供更高的空间分辨率,因此天然 具备高精度定位的能力。在采用高频 毫米波频段的高铁通信场景中, RIS 可用于一定精度的 3D 图像识别。基于 RIS实现车辆精准定位、车速精准测量, 甚至是 3D 成像,可以对车况进行监测 控制, 以确保安全, 并更好地支持智 能驾驶与调度。

若想利用 RIS 超大规模天线阵元 和超大天线孔径来获得高精度定位, 需要在铁路沿线部署一定密度且具备 测量感知能力的 RIS,即这些 RIS 面 板上需要配备有足够密度且具有测量 能力的有源天线阵子,从而可以精确 估计目标物体与 RIS 之间的信道状态 信息。相对于仅具有无源天线阵子的 RIS, 配备有源天线阵子的 RIS 的复杂 度与成本都会更高, 部署时需要综合 权衡复杂度及成本与列车定位精度需 求之间的关系。

相比于基于传统高铁通信网络的 收发机进行无线感知与定位,引入 RIS 进行电磁环境感知与定位主要有三大 优点: RIS 更易于在铁路沿线大规模 部署,可以实现铁路沿线无盲区的环 境感知和定位;组成 RIS 的大量有源 单元可以收集丰富的信息,从而获得 高精度、细粒度的高铁沿线的电磁环 境感知结果;所获得的大量数据信息 可应用于数据驱动的人工智能技术, 进而挖掘更全面、更准确的高铁沿线 的电磁环境信息。

3 RIS 使能智能高铁无线通信的 关键技术

RIS 使能无线通信涉及 RIS 硬件 结构与调控、基带算法、网络架构与 组网等诸多方面的技术。本文中,我 们仅对其中需要特别优化的几项关键 技术进行探讨。

3.1 高铁场景 RIS 信道测量与建模

在常规场景下, RIS 的研究工作 大多建立在简单的数学模型基础上, 目前仅有初步的测量及简单的建模^[12], 尚未有准确可用的信道模型; 对智能 高铁通信这种特殊场景,更缺乏必要 的测量和建模。RIS 的引入将会给智 能高铁通信的信道测量及建模带来巨 大的挑战。这些挑战这主要包括如下 几方面:

(1) RIS 可能会用于智能高铁通 信的典型频段与业务场景,因此需要 考虑智能高铁通信典型的频段、典型 场景中的无线信道测量、信道特性与 信道模型等。

(2) RIS 的引入会使得基站(BS) 与 UE 之间的信道关系发生变化,并 增加 BS-RIS-UE 级联路径及 RIS-RIS 之间的传播路径。在高铁网络中, RIS 部署在铁路沿线、列车车窗玻璃上、 列车车顶及列车车厢内部等,这几种 部署方式会导致 RIS 的传播信道有较 大差异。例如,当 RIS 部署在铁路沿 线时, NB-RIS 之间的信道慢变, RIS-UE 之间的信道快变;当 RIS 部署在列 车上时, NB-RIS 之间的信道快变, RIS-UE 之间的信道慢变。

(3) 在铁路沿线部署 RIS 的一些 特殊场景也对 RIS 信道的测量及建模 带来挑战。例如,当 RIS 部署在隧道里、 沿线桥梁上,以及沿线场站时,均需 要进行对应场景的信道传播特性测量 和信道建模研究。

准确测量与建模 RIS 使能的智能 高铁无线通信信道是一个全新的挑战, 需要继续加大研究投入,从而为基于 RIS 的智能高铁通信系统的设计、网 络优化、性能评估奠定基础。

3.2 信道估计与反馈

在常规场景下, RIS 使能的无线 网络的信道估计主要面临两方面的挑 战: RIS 信道由 NB-RIS 之间及 RIS-UE 之间信道联合构成,需要考虑两段 联合信道的估计; RIS 一般拥有超大 规模的天线阵子数量。对于智能高铁 通信这种特殊场景,可以利用其信道 特性来消除上述挑战带来的影响,降 低 RIS 信道估计的复杂度与反馈开销。

智能高铁通信信道有4个特点:

(1)沿铁路线信道随列车前行呈规律性变化;

(2)信道的角度域稀疏,尤其是 高频毫米波频段;

(3)信道变化具有鲜明的地理/ 位置相关性;

(4)列车上终端整体迁移,UE 组的信道具备共性特征。

另外,在常规的部署场景中,一

般 NB-RIS 之间为慢变信道,而 RIS-UE 之间为快变信道^[13]。对于智能高铁 通信场景, RIS可以部署在车窗玻璃上, 此时 NB-RIS 之间为快变信道, RIS-UE 之间为慢变信道。

智能高铁通信信道随高铁沿固定 轨道运行,传播特性呈规律性变化。 因此,在智能高铁通信场景下,网络 可能不需要完整、精确的信道状态信 息(CSI)反馈,采用有限空间量化精 度的码本反馈即可满足反馈精度的需 求。基于先验的列车运行轨迹、运行 速度,可以精确地实现前向预测估计, 从而获取信道并进行反馈。由于无线 信道复杂多变, AI 用于无线通信的泛 化性能受限。对于高铁通信这种具有 规律性变化的场景,可以率先利用 AI 来优化通信性能。例如,对于信道量 化的码本设计,可以采用离散傅里叶 变换(DFT)等传统方法进行量化, 也可以采用 AI 训练获得合适的码本集 合。对于码本反馈,可以利用变化规 律性及运行速度,反馈合适的码本集 合及其变化规律。进一步地,利用列 车行驶的地理位置与信道状态的关系, 设计针对特定铁路沿线地理位置的码 本集合,从而可以采用有限的、码本 个数精确的量化信道空间。为提升基 于码本反馈的准确性,可辅以反馈一 定的信道校准信息,对码本进行调整、 校准。例如,基于地理位置的码本集 合更新实现过程为:基于基站 k 的地 理位置, 预配置对应的码本集合 A_{i} ; 当列车经过该基站时,基站把该码本 集合A_k配置给列车上的UE;基于测量, UE 从A₄选择合适的码本并反馈给基 站 K_{\circ}

另外,网络可以利用速度估计、 位置以及位置变化估计等信息,来预 测下一时间点的信道状态,无须对信 道进行实时估计反馈;当列车上的 UE 集合进行整体迁移时,UE 组的信道在 信号离开角(AoD)/到达角(AoA)、 速度、多普勒频移等方面具备共性, 这些 UE 组共性信道参数仅需要反馈 一次。

上述两个典型特性均可进一步减 少反馈开销,并解决反馈时延问题。

3.3 波束赋形

通过调控 RIS 每个单元的相位, 可以调整波束,使其朝着特定方向发 射信号,从而降低所需信号的发送功 率,提高频谱效率,扩大覆盖范围, 削弱干扰。在传统的多天线蜂窝网络 中,波束赋形设计主要是对多天线的 收发机的预编码与解码矩阵进行设计, 实现信号定向传输。在 RIS 辅助的通 信系统中,智能高铁通信的高速时变 信道环境使得系统的波束赋形设计变 得更加复杂。幸运的是,我们可以利 用智能高铁通信的规律性位置与移动 对波束进行设计,以降低波束赋形的 复杂度¹¹⁴。

对于铁路沿线 RIS, 其波東赋形 设计包括远场场景和近场场景两种典 型情况。远场场景是指列车远离 RIS/ NB 的情况, 该场景具有路损高、穿透 损耗高、角度变化相对较慢、多普勒 频移整体偏移一个方向等突出特点。 因此,需要采用波束赋形来增强信号, 以减少路径损耗。采用窄波束方式, 利用列车特有的角度变化规律及移动 速度,可以使波束更好地对齐列车不 同部位的车厢。近场场景是指列车靠 近RIS/NB或列车经过RIS/NB的情况, 该场景具有路损低、穿透损耗相对低 (信号入射车窗及车厢的角度较小)、 角度变化快、多普勒频移跳变等特点。 不过,近场场景对波束赋形增益需求 较低,因此可以考虑宽波束或者广播 模式,以解决角度快变跟踪问题。如2.1 节所述,近场场景有一种特殊情况, 即列车经过 RIS 时会存在多普勒频移 跳变问题,此时波束赋形方向需要进 行精巧设计。一个可能的设计是:采 用相邻的多个 RIS,且每个 RIS 的波 束仅对齐覆盖 RIS 单侧的车厢,从而 规避多普勒频移跳变问题。针对智能 高铁通信中列车的多用户或多小区共 享一个 RIS 的需求,可以把 RIS 反射 表面的天线阵元进行分块,不同子块 的天线阵元对不同 UE 或不同小区的 入射信号进行不同权值的波束赋形^[15]。

为降低波束赋形的复杂度,可以 利用高铁通信信道的规律性,对信道 空间进行码本量化。根据地理位置和 运动规律,设计波束赋形的预编码矩 阵集合、预编码矩阵切换规律及切换 速度。进一步地,为避免信道特性波 动带来的空间量化偏差,可以半静态 估计信道差异,修正/更新先验的预 编码集合、切换规律及切换速度等参 数集合。

另外,恰当的智能高铁通信波束 赋形设计也可以提升小区容量。假设 RIS 的部署密度足够高,列车则可以 同时被多个相邻的 RIS 波束覆盖。此 时,可以采用窄波束,以尽可能减少 每个 RIS 波束覆盖列车车厢的数量。 因为不同 RIS 波数分别覆盖列车不同 部位的车厢,这样就等于通过窄波束 实现更小的扇区划分,提高了空间隔 离度,从而提升频率重用系数,达到 大幅提升小区容量的目的。

3.4 网络架构与部署

本节中,我们将基于智能高铁通 信需求的特点及 RIS 技术特性,全面 地讨论 RIS 网络架构设计和网络部署。

文献 [16] 指出,智能高铁的通信 需求可分成四大类场景: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。智能高铁通信需 求具有鲜明的特征,主要表现为容量 和覆盖需求在地理空间上分布极不均 衡,具有鲜明的规律性,即业务需求 仅局限于铁路沿线;随着列车高速运 行整体迁徙,体现为群切换、容量和 覆盖需求整体迁徙;沿铁路线线性规 律分布。

文献 [17] 给出了传统的基于 RRU 的铁路通信网络拓扑结构,具体如图 1 所示。对于基于 RIS 的高铁通信的 典型部署方式,基于高铁的环境与信 道特点,并结合 RIS 的技术特性,文 献 [3] 提出了 3 种部署模式,具体如图 2。本文中,我们做了补充,总结了 4 类典型的网络部署模式:铁路沿线部 署 RIS;车厢顶部部署 RIS,用于高铁 移动中继或 CPE 的增强天线;车窗玻 璃部署透明增强 RIS;车厢内壁部署 RIS。其中,第 2 类是新增类型。



▲图1基于射频拉远单元的铁路通信网络拓扑结构 ¹⁷⁷

赵亚军 等



▲图 2 RIS 辅助的高铁通信场景

高铁通信业务需求具有随着高铁 运动整体迁移的特点,即只有高铁经 过的小区需要业务连接。在本次高铁 经过后至下一趟列车到达前,该小区 不需要支持高铁通信。一个很自然的 想法是:如前文 2.2 节所述,铁路沿线 的相邻基站可以接力共享两者之间的 RIS。采用共享 RIS 方案, 仅需要基站 之间切换低带宽控制信令,且RIS 控 制信令的时延要求可以适度降低,以 在 RIS 控制的动态性与共享切换的实 时性之间取得平衡。而传统高铁网络 的相邻两个基站共享 RRU 或分布式天 线时,需要低时延地切换大带宽的业 务数据及控制信令,该过程的实现复 杂度较高。

基站控制 RIS 的回传链路,不同 部署方式有不同的设计约束,因此可 选的实现方式也有差异。对于 RIS 部 署在铁路沿线的模式,基站与 RIS 之 间的回传链路可以采用有线或者无线 通信方式。无线回传的连接方式部署 灵活,但需要占用频谱资源传输 NB-RIS 之间的控制信令,因此会有一定 的频谱资源开销。不过,该回传链路 控制信令的信息速率较低,频谱占用 的开销并不高。对于 RIS 部署在列车 车窗玻璃及车厢内部的两种模式, RIS 与基站之间的回传链路显然只能采用 无线通信方式。部署在车顶用以增强 移动中继或 CPE 天线的 RIS,其受控 于移动中继或 CPE,因此其回传链路 是与移动中继或 CPE 连接的,且一般 采用有线方式连接。

上述的部署模式,均需要保证基 站间、基站与 RIS 之间的空口同步关 系,从而确保 RIS 幅度相位调控与信 道/信号之间的同步关系。尤其是当 多个 RIS 波束赋形同时服务一个 UE 时,类似于传统 CoMP 的联合传输, 需要精准的时间同步及相位对齐。

隧道覆盖可以采用 RIS 以增强现 有分布式天线系统(DAS)的传统天 线形态。这种天线体积更小且方便部 署在隧道壁侧,不会明显突起。考虑 到 RIS 的低成本特性,隧道壁侧可以 部署更多无源反射 RIS,并可以通过 高密度 RIS 来实现隧道内信号覆盖的 调控增强。

4 未来研究趋势与挑战

RIS 使能未来智能高铁通信仍然 面临诸多技术问题、部署问题和标准 化问题。针对高铁通信特有应用场景 中的 RIS 关键技术和方案,人们需要 对以下几个方面展开深入研究和全面 评估:

(1)引入 RIS 后,智能高铁通信的信道测量与建模;

(2) RIS 使能的智能高铁通信网 络的信道估计与波束赋形设计与优化;

(3) RIS 使能的智能高铁通信网 络与铁路沿线的多网络共存;

(4) RIS 使能的智能高铁通信网 络下多用户及多业务类型的共存优化;

(5)适用于智能高铁通信网络不同场景需求的多种 RIS 形态设计;

(6) RIS 使能的智能高铁通信网 络架构及部署研究及优化。

5 结束语

本文中,我们系统地探讨了 RIS 在智能高铁通信场景应用中的关键技 术及面临的机遇与挑战。作为超材料 的二维实现, RIS 具有低成本、低复 杂度和易部署的特性。通过构建智能 可控无线环境, RIS 将给未来 6G 带来 一种全新的通信网络范式,满足未来 移动通信需求。简化版本的 RIS 将可 能在 5G/5G-Adv 阶段,实现初步商业 部署及标准化,尤其可以用于改善 5G 毫米波覆盖问题。

智能高铁作为一种重要的智能交 通基础设施,是中国在技术及产业均 全面领先的领域,属于"新基建"的 范畴。RIS则是由中国自主提出并引 发全球跟进的技术,未来将成为中国 在基础性原创技术及全产业链全面领 先的潜在突破领域之一。智能高铁新 基建与 RIS 构建的电磁新基建相结合,

专题

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

未来将会获得更加广阔的技术和产业 前景。

参考文献

- [1] YUAN Y F, ZHAO Y J, ZONG B Q, et al. Potential key technologies for 6G mobile communications [J]. Science China-information sciences, 2020, 63(8): 183301. DOI: 10.1007/ s11432-019-2789-y
- [2] RENZO M D, DEBBAH M, PHAN H D T, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: an idea whose time has come [EB/OL]. (2019-03-21)[2021-06-111. https://arxiv.org/abs/1903.08925v1
- [3] LIU H, ZHANG J Y, WU Q Q, et al. RIS-aided next-generation high-speed train communications-challenges, solutions, and future directions [EB/OL]. (2021-03-17)[2021-06-11]. https://arxiv.org/abs/2103.09484
- [4] BASAR E. Reconfigurable intelligent surfaces for doppler effect and multipath fading mitigation [EB/OL]. (2021-05-13)[2021-06-10]. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/ frcmn.2021.672857/full
- [5] 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. DOI: 10.12142/ZTETJ.201906007
- [6] LU C F, LIU J F, LIU Y H, et al. Intelligent construction technology of railway engineering in China [J]. Front engineering management, 2019, 6(4): 503-516. DOI: 10.1007/s42524-019-0073-9
- [7] BASAR E, RENZO M D, ROSNY D, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces [J]. IEEE access, 2019(7): 116753-116773
- [8] 樊学宝,何春霞.高铁 LTE 网络覆盖研究 [J]. 移 动通信 , 2016, (1): 84–90

- [9] ZHAO H, MAYZUS R, SUN S, et al. 28 GHz millimeter wave cellular communication measurements for reflection and penetration loss in and around buildings in New York city [C]// 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC). Budapest, Hungary: IEEE, 2013: 5163-5167
- [10] 刘蕾,田磊,陈旭彬,等.28GHz下对毫米波透 射特性的分析 [J]. 电波科学学报, 2017, 32(5): 513-519
- [11] TAKVUTIE J, LEVANEN T, KOIVISTO M, et al. Positioning of high-speed trains using 5G new radio synchronization signals [J]. 2018 IEEE wireless communications and networking conference (WCNC). Barcelona, Spain: IEEE. 2018
- [12] TANG W K, CHEN M Z, CHEN X Y, et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: path loss modeling and experimental measurement [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(1): 421-439
- [13] HU C, DAI L L, HAN S F. Two-timescale channel estimation for reconfigurable intelligent surface aided wireless communications [EB/OL]. [2021-06-12]. https://ieeexplore. ieee.org/document/9400843
- [14] MATTHISESEN B, BJ E, CARVALHO D E, et al. Intelligent reflecting surface operation under predictable receiver mobility: a continuous time propagation model [J]. IEEE wireless communications letters, 2021,10(2): 216-220. DOI: 10.1109/LWC.2020.3024781
- [15] JIAN M, ZHAO Y. A modified off-grid SBL channel estimation and transmission strategy for RIS-assisted wireless communication systems [C]//2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Limassol, Cyprus: IEEE, 2020: 1848-1853. DOI: 10.1109/IWC-MC48107.2020.9148537
- [16] 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
- [17] 3GPP. Study on scenarios and requirements for next generation access technologies: 3GPP TR 38.913 [S]. 2018



作

者

简

介

赵亚军,中兴通讯股份

有限公司无线研究院技 术预研总工;目前主要

从事5G标准化技术和 6G的研究: 主要研究

方向包括智能超表面、

章嘉懿,北京交通大学 教授;研究方向为大规 模 MIMO、智能无线通 信;获得 IEEE 通信学会 亚太地区杰出青年奖和 中国电子学会自然科学 一等奖;发表论文100 余篇。



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 顶。

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^{1,2,3}, 官科 /GUAN Ke^{1,2,3}, 陈为 /CHEN Wei^{1,2,3}, 艾渤 /AI Bo^{1,2,3}

(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;

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 railway mobile communications. In the current and future implementation of the new generation of railway mobile 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, 中国高铁运营里程达3.79×10⁴km, 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 7×10⁴ 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

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)

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^[1]。

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70×10⁴ km 的现 代化高质量国家综合立体交通网,其 中, 铁路约为 2×10^5 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 专家论坛

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-Fi6、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^[2]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 指标的进行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^[3]。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⁽⁴⁾ 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^[5]。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^[6]。

(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 在区块链节点上,能够保证这些数据 信息的完整性、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 1×10⁴ 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 的重要保障。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¹⁷¹、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, 使工程师在面对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。

钟章队 等

(4) 数字孪生

数字孪生技术是以数字化方式创 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、虚拟联接以及全天候(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¹⁸。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⁹⁹。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¹⁸¹、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-Fi6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 谏转移转化,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。

参考文献

- [1] ALB MOUSCHAE BUPP 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] 7HU J K CHEN G 7HANG 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/ i 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 microwaves, 2021, 1(1); 101-122, DOI; 10,1109/ JMW 2020 3035541

[5] 中国信息通信研究院 云计算发展白皮书 [B] 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 12142/7TET.J 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



钟章队,北京交通大学 轨道交诵控制与安全国 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 动信息通信铁路行业重 点实验室主任;从事无 线通信与宽带移动通信、

介

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、 二等奖5顶,中国图书优秀学术著 等奖3顶、 作一等奖1顶,中国高等学校十大科技进展1 顶,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导师奖,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 丁智能技术研究,并用 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 顶。

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL



5G 半导体产业发展和创新趋势思考

Reflections on Development and Innovation Trend of 5G Semiconductor Industry

刘新阳 /LIU Xinyang

(深圳市中兴微电子技术有限公司,中国 深圳 518081) (Sanechips Technology Co., Ltd., Shenzhen 518081, China)

> DOI: 10.12142/ZTETJ.202104010 网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/ detail/34.1228.TN.20210722.1358.002.html

> > 网络出版日期:2021-07-23 收稿日期:2021-06-24

摘要:5G是引领未来科技发展的基础通信技术,更是经济和社会发展的基础保障。5G芯片 技术及其行业发展将会是这场科技浪潮的重点。在5G和人工智能(AI)等技术促进设备连 接数量和规模爆发式增长的同时,人工智能物联网(AloT)、新型终端、新能源/无人驾驶 汽车等新兴领域都对芯片技术提出了新的要求。在传统摩尔定律下,尺寸微缩逼近物理与经 济极限,新型器件、先进封装、第3代半导体等新技术和新材料将引领半导体产业走向新的 产业格局。

关键词:5G;芯片;创新机遇

Abstract: 5G is the basic communication technology leading the future development of science and technology, as well as the basic guarantee of economic and social development. 5G chip technology and its industry development will be the focus of this wave of science and technology. While 5G, artificial intelligence (AI) and other technologies promote the explosive growth of the number and scale of device connections, emerging fields such as artificial intelligence Internet of Things (AloT), new terminals, new energy/ driverless vehicles all put forward new requirements for chips. With the traditional Moore's Law, size reducion is approaching the physical and economic limits. New technologies and new materials such as new devices, advanced packaging, and third generation semiconductors will lead the semiconductor industry to a new industrial pattern.

Keywords: 5G; chip; innovation opportunity

15G促进半导体产业升级

2020年4月, 在中国国家发展和改 革委员会的新闻发布会上, "新 基建"的范围首次被明确。作为新基 建七大领域之首, 5G 在拉动投资、促 进产业升级、培育经济发展新动能等 方面潜力巨大, 未来将为新基建提供 强大的智能引擎。

目前,5G正进入加速发展期。全 球移动通信系统协会(GSMA)的最 新报告显示,全球已有47个国家发布 106张5G商用网络,有409家全球运 营商投资5G网络。中国的5G网络建 设位于全球前列。截至目前,中国累 计建设的5G基站数量超过71.8万个, 占全球基站总数的70%。权威机构预 测,2025年中国将会有8.07亿个智能 终端和80亿个物联网(IoT)连接, 通信网络产业将迎来新一轮发展契机。

GSMA 最新发布的《2021 年全球 移动经济报告》显示,到 2025 年底, 5G 连接数量将达到 18 亿个,约占移 动连接总数的 20%。

通信产业每10年发展一代。相比于2G、3G和4G,5G拥有三大业务应用场景,并且业务需求已发生重大变化^[11]。5G将深入各行各业,进一步解

决物与物的联接问题,促进产业的数 字化转型。新需求带来端到端技术的 变革,通信芯片将面临新的挑战。

(1) 数据规模急剧增长

5G 催生海量数据,需要提升计算 力,释放数据价值。5G 海量物联网的 感知层、连接速率的提升和时延的降 低,都将极大地驱动数据量增长。因 此,通信芯片除了要具备通信功能外, 还需要拥有强大的计算能力,以满足 云网融合下网络架构深刻变革的需求。 在"多系统、多场景、多业务"的云 网业务需求和技术创新并行驱动下, 云和网高度协同,互相支撑。在此背 企业视界

景下, 云计算向着集中化和边缘计算 两个方向发展, 中心云向着通用化、 更强的计算能力和人工智能(AI)训 练能力方向发展, 边缘云则向着领域 定制、更高的能效和 AI 推理能力方向 发展。网络能力架构需要以计算和联 接为核心, 这对通信芯片提出更高的 智能化计算需求^[2]。

(2)芯片设计复杂度不断增加

以基带芯片为例,5G 通过复杂的 编码来实现频谱利用率的提升。多通 道、高频率和大带宽共同推动数据吞 吐量的增加。基带芯片需要应对5G多 样化的应用场景,兼顾低功耗诉求。 这些都使得芯片设计变得非常复杂。

(3)上游芯片供应链面临挑战

受益于 5G 网络, 射频前端模拟 器件、面向边缘计算的高性能处理器 和光器件都具有广阔的发展前景。然 而,目前上游芯片供应链多样化的供 应能力有待加强。部分中国厂家虽然 已经具备一定的研发和生产能力,但 是在产业规模商用和性能提升方面仍 需要做进一步努力。

2半导体技术创新发展趋势

由于摩尔定律效应正在放缓,为 了延续指数级的进化,业界和学界都 做出大量尝试。具体来看,架构设计 更注重系统层面优化和单位面积效能 提升。系统厂家注重垂直整合,并通 过系统集成芯片来获取发展新动能, 例如片上系统(SoC)和系统级封装 (SIP)。晶体管微缩在未来5年内 仍将持续。新材料、新封装技术的发 展,为摩尔定律的延续开辟了另一条 道路。

晶体管微缩接近极限,驱动业界 寻找其他路径。目前,最先进的5nm 工艺制程已经实现规模量产。为持续 发展先进制程并给产业发展增添信心, 在进入3nm工艺制程后,全新的全环 绕栅极(GAA)晶体管将替代鳍式场效应晶体管(FinFET),以解决制造 难题,推动晶体管持续微缩。同时,设计工艺协同优化(DTCO)、系统工 艺协同优化(STCO)等协同技术的引入,使得摩尔定律效应在未来5年仍 得以延续。

然而,有数据显示,先进工艺达 到 28 nm 以后,将进入一个新的拐点: 设计费用和单位芯片成本不降反升。 一个 5 nm 工艺 SoC 芯片的设计费用, 是 16 nm 工艺 SoC 芯片设计费用的 5 倍。高昂的设计费用和低良率问题, 驱动着行业寻找其他路径。

高级封装技术将成为性能和成 本持续优化的另一创新路径。灵活性 和性价比也是芯片设计的重要考量因 素,因此 Chiplet 方案获得广泛关注。 Chiplet 是将一块大的单芯片拆分为多 个小芯片,再通过高级封装进行重组。 它的优势是灵活性高、综合成本低。 不同功能的 Die 可以选择不同的制造 工艺。这种方案的 Die 良率更高,并 且可以通过 Die 组合来满足不同市场 需求。结合 Chiplet 方案, 2.5D/3D 高 级封装技术的快速发展,将为芯片设 计打开一扇新大门。

SoC 架构的创新对芯片性能的提 升起到关键作用。在架构设计时,设 计师们需要在灵活性(可编程)和高 效性(专用)之间做权衡。在多个异 构处理单元组成的 SoC 中,领域定制 SoC(DSSoC)方法有助于提升系统的 开发和运行效率。DSSoC 架构设计的 五大技术目标包括:(1)感知计算资 源和应用程序指令,跟踪芯片间和芯 片内数据的智能调度;(2)采用完整、 统一的工具链,提升编程效率;(3) 完成应用到计算单元、内存的最优映 射;(4)在计算单元之间构建低功耗、 低延时的通信网络;(5)快速集成异 构的计算单元。

3 企业应对策略

创新是根本,并推动产业结构优 化升级。受益于 5G 行业市场的迅速发 展,如物联网和工业智能制造等,芯 片的重要性日益凸显,相关领域对芯 片的需求实现突破性增长。芯片技术 是 5G 技术的核心。对此,中兴通讯坚 持以产品为中心,聚焦核心技术创新, 提升产业基础集成电路(IC)能力; 聚焦产品应用,借助中国通信产业市 场地位发挥高水平系统技术能力;以 龙头企业在系统架构上进行创新驱动, 构建开放式协同创新模式,联动上下 游多路径发展。中兴通讯一方面积极 参与国际科技合作,采用业界先进技 术持续提升竞争力;另一方面把握半 导体技术由先进工艺转向先进封装/ 架构的技术转折点,在成熟工艺上通 过系统厂家的架构设计创新,构建产 业发展新生态。

参考文献

- [1] 严斌峰, 袁晓静, 胡博. 5G 技术发展与行业应用 探讨 [J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(6): 34-41. DOI: 10.12142/ZTETJ.201906006
- [2] 壬健, 郑爽, 曹晓平. 智能硅基多维复用与处理芯片 [J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(2): 51–63. DOI: 10.12142/ZTETJ.202002008



可硬件研究所副所长、微电子研究院副院长、 手机终端整体解决方案产品线产品总经理;主要从事战略和技术规划、公共事务工作;拥有 20余年通信集成电路设计经验,曾主持多个 重大产品的研发项目,并完成产品的商用和批 量交付。

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL



5G毫米波通信中的物理层安全预编码

Physical Layer Secure Precoding in 5G Millimeter Wave Communication Systems

摘要:安全预编码是一种信号处理技术,即发送端根据信道状态信息设计预编码矩阵,从而对 信号进行预处理。该技术旨在保证合法用户通信质量的前提下,恶化窃听信道,在信息理论意 义上实现无线通信系统的安全传输。认为物理层安全技术与移动通信的发展密不可分,利用 毫米波信道稀疏特性开发物理层安全预编码技术,有望实现5G通信与安全一体化发展。从长 期角度为网络优化部署提供指导,提升网络流量水平,释放流量增长潜力。

关键词:5G;毫米波;物理层;安全通信;预编码

Abstract: Secure precoding is a signal processing technique. Precoding matrix is designed at the transmitter to pre-process signal based on channel state information, aiming to ensure the communication quality for legitimate users and worsen the eavesdroppers' channels. Secure transmission of wireless communication systems is realized in the sense of information theory. The physical layer security technology is inseparable from the development of mobile communication. By developing physical layer security precoding technology with millimeter–wave channel sparse characteristics, it is expected to realize the integrated development of 5G communication and security.

Keywords: 5G; millimeter wave; physical layer; secure communications; precoding

倪云云/NI Yunyun¹

陈伯庆/CHEN Boqing¹

李刚/LI Gang²

 南京邮电大学,中国南京210003;
 中兴通讯股份有限公司,中国深圳518057)
 Nanjing University of Posts and Tele – communications, Nanjing 210003, China;
 ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI:10.12142/ZTETJ.202104011 网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20210727.1526.005.html 网络出版日期:2021-07-27 收稿日期:2020-09-06

2019年6月6日,中国正式进入了 5G商用阶段。5G通信系统采用 了大规模多输入多输出(Massive MI-MO)、毫米波、非正交多址接入(NO-MA)等关键技术^{III},将以超过千兆的 比特率以及低于1 ms的延迟,满足大 容量、高速率、低延迟的通信需求。 5G关键技术的发展不断提升合法用 户的性能,但同时这些技术也可能会 被窃听者恶意利用,从而影响通信安 全。5G通信中,不同场景下的用户对 于通信质量的需求各异,例如海量机 器类通信(mMTC)、增强移动宽带 (eMBB)等场景下的用户对无线业务的需求大相径庭。我们需要针对不同场景下的用户需求,并结合5G新技术和独特的无线信道特性,研究相适的安全通信策略,以满足5G通信中多场景、多等级的弹性安全需求。

相比于传统安全机制,物理层安 全(PLS)技术充分利用无线信道的时 变性和多样性,以及合法通信双方信 道的唯一性和互易性等内生安全特 性^[2],保障比特流的安全传输,使比特 流不依赖于传统的密钥便有望实现 香农于1949年在《保密系统的通信理 论》中提出的基于信息论意义上的 "完美安全"^[3]。传统安全技术主要在 上层实施,如数据链路层的认证机制 和应用层的加密机制。PLS技术作为 上层安全的有力补充,与传统安全机制相辅相成,极大地增强整个通信系统的安全性能。

如图1所示,PLS分为物理层认 证、无密钥安全技术和密钥生成技 术。物理层认证技术利用无线信道 特性区分合法用户和窃听用户,防范 入侵者的假冒攻击。无密钥安全技 术基于A.D.WYNER提出的窃听信道 模型⁽⁴⁾,在已知的信道状态信息(CSI) 指导下设计安全预编码矩阵和安全 信道编码方案,以实现无密钥安全。 安全预编码方案利用CSI设计预编码 矩阵,以最大化保密容量为目标设计 优化问题并求最优解,实现合法用户 的安全通信。安全预编码方案包括 波束成形、人工噪声以及天线子集选

基金项目:中兴通讯产学研合作项目(2019ZTE01-02-16); 江苏省高等学校自然科学研究项目 (19KJB510048);江苏省研究生科研创新计划(KY-CX17_0781)



▲图1物理层安全技术框架图

择等。波束成形是通过设计预编码 矩阵调节发射天线阵列或其子阵列, 将发送信号的能量集中到合法用户 方向,以提高合法用户的信道条件, 从而增强接收信号质量。人工噪声 利用无线信道以及噪声内在的随机 性,使得合法用户的信道质量优于窃 听者信道,以保证合法用户的信噪比 高于窃听者,从而达到安全传输的目 的。天线子集选择在保证合法用户 正常接收信号的同时,扰乱窃听者星 座图,使窃听者无法准确解调信号。 而物理层密钥生成技术利用无线传 输信道的互易性和唯一性,并根据通 信双方随机变化的无线信道生成安 全可靠的密钥。物理层安全不需要 特定的硬件系统,与上层结构相互独 立,易应用于现有的通信系统。物理 层安全可以在5G及未来的无线通信 领域发挥更大的作用。

15G 毫米波无线信道特征分析

1.1 毫米波频段 Massive MIMO 信道 分析

为了实现最高20 Gbit/s的网速, 5G要将带宽提高到1GHz以上。目

前,6GHz以下已经没有足够的频段 了,因此5G使用了毫米波技术。毫 米波频段高、频谱资源丰富,具有更 高的信道容量。5G通信将在毫米波 频段获得较高的通信带宽,并采用基 于大规模有源阵列天线的 Massive MIMO技术来大幅提升接入网性能。 毫米波通信在链路的收发端使用 Massive MIMO,所具有的信道容量将 远远超越香农公式中基于单输入单 输出(SISO)系统所给出的信道容量 限制。在 Massive MIMO系统中引入 波束成形技术,将波束集中到指定位 置,不仅可以提高能量效率,还可以 减少不同用户之间通信的互相干扰, 允许单一基站(BS)接入海量的设备, 提升基站容量,实现"万物互联"。

在传统的 MIMO 系统中, 我们通 常假设信道为瑞利衰落信道,并使用 最小二乘法等进行信道估计,发射导 频序列的长度随着 MIMO 信道矩阵的 维度增加而增加。图2的Massive MI-MO系统模型实现了水平面的波束成 形,还能够利用更多的振子和信道实 现垂直面的波束成形。毫米波 Massive MIMO系统的信道估计,对计算 能力要求更高。这使得导频开销增 加,带宽占用更多,系统吞吐量下降。 不同于传统的 MIMO 系统, 毫米波 Massive MIMO系统可以采用混合波 束架构对信道数据进行检测,一条射 频链路对应多根天线^[5]。大量的毫米 波信道测量表明,毫米波信道具有空 间域稀疏的特性。利用空时傅里叶 变换,毫米波 Massive MIMO 信道的稀 疏性可以在波束域上得以体现。基 于毫米波 Massive MIMO 信道的稀疏 性,利用压缩感知等技术可以有效地 进行信道估计,并降低导频开销。

1.2 毫米波频段的信道稀疏性分析

毫米波通信频段高、波长短,巨 大的路径损耗导致其呈现稀疏散射



▲图2 大规模多输入多输出系统模型

特性。Massive MIMO技术的使用,使 得信道矩阵维度增大,因此传统的瑞 利信道模型并不适合毫米波信道建 模。为此,研究人员提出了针对毫米 波无线通信的信道模型——分簇射 线(Cluster-Ray)模型^[6]。

在毫米波通信中,我们利用分簇 射线模型来描述毫米波信道:信道被 表示为多个分簇,入射角相似的路径 归为同一簇,毫米波信道包括视距 (LOS)路径和分簇中的非视距 (NLOS)路径。毫米波稀疏性信道如 图3所示。

毫米波的高路径损耗导致其信 道呈稀疏性,物理信道由到达角 (AOA)与离开角(AOD)决定,而MI-MO信道矩阵H本身并不呈稀疏性。 可将MIMO信道矩阵H用均匀分布的 虚拟AOA和AOD线性来表示:

 $\begin{aligned} \boldsymbol{H} &= \\ \frac{1}{\sqrt{N_r N_i}} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{k=1}^{N_i} \boldsymbol{H}_b(i,k) \boldsymbol{a}_r(i\Delta\varphi_r) \boldsymbol{a}_i^H(k\Delta\varphi_i) = \\ \boldsymbol{U}_r \boldsymbol{H}_b \boldsymbol{U}_i^H , \quad (1) \end{aligned}$

即:

$$\boldsymbol{H}_{b} = \boldsymbol{U}_{r}^{H} \boldsymbol{H} \boldsymbol{U}_{t} , \qquad (2)$$

其中,U,和U,是离散傅里叶变换酉矩

阵,它们的列是正交的阵列响应 矢量:

$$U_{r}[:,i] = \frac{1}{\sqrt{N_{r}}} \left[a_{r}(i\Delta\varphi_{r}) \right] \quad i \in I(N_{r})$$
$$U_{r}[:,i] = \frac{1}{\sqrt{N_{r}}} \left[a_{r}(i\Delta\varphi_{r}) \right] \quad i \in I(N)$$

$$\boldsymbol{U}_{t}[..,t] = \frac{1}{\sqrt{N_{t}}} \left[\boldsymbol{u}_{t}(t\Delta\boldsymbol{\varphi}_{t}) \right] \quad t \in \boldsymbol{I}(N_{t})$$

 $I(n) = \{1, 2, \dots, n\}_{\circ}$ (3)

相邻虚拟 AoD 或者 AoA 的角度 间隔分别由基站和移动台的阵列分 辨率决定:

$$\Delta \varphi_i = 1/N_i$$

$$\Delta \varphi_r = 1/N_{r^{\circ}}$$
(4)

波束空间信道矩阵 H_b是天线域 信道矩阵 H 的西等价表示,即 H_b是信 道 H 在傅里叶正交集上的投影。经 过转换之后可以发现,H_b中只有个别 元素的值较大,这些元素包含了信道 的大部分功率,所以波束空间矩阵 H_b 呈现出明显的稀疏特性。

在毫米波 Massive MIMO系统中, 基于毫米波信道在角度域上的稀疏 性,可利用压缩感知技术进行信道估 计,以降低导频开销。

1.3 多用户毫米波 MIMO 预编码

在多用户 MIMO 系统中,利用空

分复用接入(SDMA)技术可以使系统 获取更高的信道容量。毫米波多用 户MIMO系统可以在相同的时频资源 上与多个用户同时通信,并且发送多 个数据流,极大地提升了系统的总频 谱效率,而且可以通过高波束成形增 益提高传输的可靠性。毫米波多用 户MIMO系统通常只需在发射端配置 Massive MIMO阵列,因此接收端用户 采用传统 MIMO多天线即可。这不仅 可以充分利用空间资源,提升系统容 量,还可以有效地降低成本和复 杂度。

图 4 为多用户 MIMO 系统模型。 MIMO 系统能够充分利用空间自由 度,基站端有多根天线用于信号传 输,却不要求接收端有多天线。发送 端发射信号后经过预编码矩阵处理, 将信号发送给接收端,接收端进行信 号解调并获取有效信息。多用户 MI-MO 系统中的预编码方案可以按照干 扰信号处理的方式分为基于干扰抑 制和基于干扰抵消的预编码方案。 通过发射端的预编码处理,可以有效 地消除多用户间的干扰,提升系统保 密容量;还可以减少接收端的解调难 度,解决移动端的功耗和体积问题。







ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

2毫米波安全预编码

2.1 经典窃听信道模型

1975年,A.D.WYNER提出了窃 听信道模型。在该模型中,假设窃听 信道为退化的合法信道,从而保证非 负的保密能力。在合法信道质量优 于窃听信道时,总存在一种编码方 式,使得合法接收端在正确解调的情 况下,实现信息的安全传输⁽⁷⁾;而当窃 听信道质量优于合法信道时,则需要 引入人工噪声技术,恶化窃听信道质 量,保证数据安全传输。

图 5 为多输入多输出多天线窃听 (MIMOME)信道模型^[4],合法发送方 Alice端配置 N,根天线,合法接受者 Bob 配置 N,根天线,窃听者 Eve 配置 N_e根天线。Alice需要发送保密信息 x 给 Bob,因此 Bob和 Eve 的接收信号分 别为:

$$y_b = Hx + n_b$$

$$y_e = Gx + n_e \circ$$
(5)

 $H \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ 表示 Alice 到 Bob 间的 合法信道矩阵, $G \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ 表示 Alice 到 Eve 之间的窃听信道矩阵。 $x \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 表示 Alice 发送的信号, 其 中协方差矩阵为 $E \{xx^H\} = Q_x$, $Tr(Q_{*}) \leq P_{i}, P_{i} \in \mathbb{C}^{N_{e} \times 1}$ 分別表示 Bob 和 Eve 的零均值加性复高斯噪声向 量,协方差矩阵分别是 $\sigma_{i}^{2}I$ 和 $\sigma_{i}^{2}I$ 。

假设 Alice 已知信道矩阵 *HG* 的 理想 CSI,并且存在 $\sigma_b^2 = \sigma_e^2 = 1$ 。根 据香农公式,出合法信道与窃听信道 的信道容量可以表示为:

$$C_{b} = \log_{2} \det (\boldsymbol{I} + \boldsymbol{H}\boldsymbol{Q}_{*}\boldsymbol{H}^{H})_{N_{r} \leq N_{r}}$$
$$C_{e} = \log_{2} \det (\boldsymbol{I} + \boldsymbol{G}\boldsymbol{Q}_{*}\boldsymbol{G}^{H})_{N_{r} \leq N_{r}} \quad (6)$$

系统的保密容量可以用主信道 的信道容量减去窃听信道的信道容 量来实现,为了保密容量的非负性, 则有:

$$C_s = \{ \begin{array}{ccc} C_b - C_e, & C_b > C_e \\ 0, & C_b \le C_e \end{array}$$
(7)

MIMOME 窃听信道的保密容量 可以表示为:

$$C_{s}(P_{t}) = \max_{Q_{s} \ge 0, Tr(Q_{s}) \le P_{t}} \log_{2} \left(\det \left(\boldsymbol{I} + \boldsymbol{H} \boldsymbol{Q}_{s} \boldsymbol{H}^{H} \right) \right) - \log_{2} \left(\det \left(\boldsymbol{I} + \boldsymbol{G} \boldsymbol{Q}_{s} \boldsymbol{G}^{H} \right) \right)_{\circ}$$

$$(8)$$

2.2 数模混合预编码

无线通信中的安全问题可以转 化为通信资源的分配和挖掘问题,安 全能力的增强来自于通信能力的提



)

▲图5 窃听信道模型

升和通信资源的有效利用。为了挖 掘空间自由度,并且能更有效地利用 发送端能量,移动通信采用 MIMO 系 统来提高物理层链路性能。5G 通信 中 Massive MIMO 技术带来的天线阵 列增益可以弥补毫米波传输过程中 的高路径损耗。

传统的 MIMO 系统通常采用数字 预编码方案,在基带使用预编码矩阵 对信号进行预处理。这要求每根天 线单元有单独的射频(RF)链路,包括 放大器、滤波器和模数转换器(ADC)/ 数模转换器(DAC)等器件,为系统带 来空间复用及分集增益。在数字预 编码方案中,信号的幅度和相位可以 灵活设置,从而提升通信效率。但在 Massive MIMO系统中,使用全数字预 编码方案会产生高昂的硬件成本和 功耗,因此在5G通信中的预编码方 案设计里,我们一般不考虑采用全数 字预编码方案。模拟预编码技术指 使用预编码矩阵在RF端改变信号的 相位,并通过低成本、低功耗的移相 器完成相位的控制,因此从经济效益 的角度考虑,模拟预编码方案更受欢 迎。但由于缺乏对幅度的控制,模拟 预编码的性能比数字预编码差。为 了在获得天线增益的同时减少成本 支出,可通过少量的射频链连接基带 预编码与射频预编码,采用数模混合 架构进行无线信道的数据发射与 检测[8]。

图 6 为典型的毫米波混合通信系 统模型,系统中有 N_s 个数据流,发送 端与接收端配备了 N_t 、 N_t 根天线。发 送端数据经基带数字预编码 F_{BB} 进行 预处理后,通过 N_t^{RF} 个射频链路转换 至射频端。RF 链路满足 $N_s \leq N_t^{RF} \leq$ N_t ,每个 RF 链路通过 N_t 个移相器连 接至天线,并通过移相器对信号进行 模拟预编码。在此硬件架构下,发送 端采用 $N_t^{RF} \times N_s$ 的基带预编码矩阵 F_{BB} 和 $N_t \times N_t^{RF}$ 的RF预编码矩阵 F_{RF} 。 RF预编码矩阵 F_{RF} 的元素幅度相同, 系统总发射功率通过 F_{BB} 进行限制, 使得 $||F_{RF}F_{RF}||_F^2 = N_s$ 。

考虑一个窄带慢衰落传播信道,则接收端信号为:

$$y = \sqrt{\rho} H F_{\rm RF} F_{\rm BB} s + n_{\circ}$$
(9)

H 为 N, × N, 的信道矩阵, ρ 代表平均 接收功率, 经接收端处理过后的信号 可表示为:

 $\tilde{\boldsymbol{y}} = \sqrt{\rho} \boldsymbol{W}_{BB}^{H} \boldsymbol{W}_{PF}^{H} \boldsymbol{H} \boldsymbol{F}_{PF} \boldsymbol{F}_{BB} \boldsymbol{s} + \boldsymbol{W}_{BB}^{H} \boldsymbol{W}_{PF}^{H} \boldsymbol{n},$ (10)

其中, W_{RF} 是大小为 $N_r \times N_r^{RF}$ 的射频 组合矩阵, W_{BB} 是大小为 $N_r^{RF} \times N_s$ 的 基带组合矩阵。与射频预编码矩阵 相同, W_{RF} 通过移相器实现并且元素 幅度相同。假设传输的符号为高斯 符号,系统的频谱效率为^[9]:

 $R = \log_2 \left(|I_{N_1} + \frac{\rho}{N_s} R_n^{-1} W_{BB}^H W_{RF}^H H F_{RF} F_{BB} \times F_{BB}^H F_{RF}^H H^H W_{RF} W_{BB} | \right), \qquad (11)$

其中,**R**_n是经过组合器后的噪声协 方差。

2.3 波束成形

波束成形是一种经典的多天线 技术,通过调整发送天线权重系数, 使天线主瓣对准合法接收用户,从而 减少信号泄露。波束成形提高合法 用户的信噪比,并降低潜在窃听者的 信噪比,提升系统安全容量。

图 7 为 Massive MIMO 系统。 Massive MIMO 系统中的天线阵列为 实现定向波束而部署,它可以利用波 阵面相干叠加原理在指定方向增强 波束,在其他位置削弱波束强度,从 而增加信道容量。

文献[10]研究了毫米波 MIMOME 系统的数模混合预编码,在已知窃听 者 CSI 的情况下,提出模拟预编码器 和组合器的联合设计以防止信息泄 露,并基于等效基带信道计算数字预 编码器和组合器以最大化安全速率。 文献[11]提出,在毫米波 MISO 系统 中,可以使用离散角域信道模型来分 析信道路径,以获得目标用户和窃听 者间公共信道路径数目的概率分布 函数,推导出最大比传输(MRT)连接 概率的闭合表达式,并分析主动和被 动窃听者场景下的保密中断概率。 在 MISOSE 系统中,文献[12]提出,使

用相控阵传输结构,并利用复平面中 的多边构造解决星座合成问题,以符 号速率改变传输权重向量,从而在接 收端获得预期的相位,并在窃听者处 产生随机性。额外的随机相位旋转 添加至发送权重向量中,在不显著降 低接收端符号检测的可靠性的前提 下,给窃听者造成干扰。同样,在 MISOSE系统中,文献[13]创建了由传 统相控阵和可编程功率放大器组成 的可编程加权相控阵(PWPA)结构, 在此基础上提出反置天线子空间传 输技术和优化加权天线子空间传输 技术,利用天线阵列的幅值权重扰乱 非预期方向的星座图,并在非预期方 向产生人工噪声。PWPA增加了攻击 者向量估计的难度,从而提升系统的 安全性能。

在随机几何架构中的毫米波/微 波异构网中,文献[14]基于随机阻塞 模型和固定视距模型,分析节点位置 和阻塞模型的不确定性,描述保密中 断概率和条件链接概率,推导出LOS 和NLOS下的条件保密中断概率的上 下限,利用阻塞提升系统保密性能。 在窃听者随机分布的场景中,文献 [15]结合毫米波信道特性,推导随机



▲图7 大规模多输入多输出系统

▲图6 毫米波通信系统模型

阻塞和保密中断概率的闭合表达式, 并分析不同参数对保密性能的影响。

合理的波束成形方案可将主波 束对准合法用户,提高了信噪比,优 化了数据传输速率。同时,还可以限 制窃听者的接收信号功率,弱化其窃 听能力。但是,波束成形方案需要知 道窃听信道状态信息或者其他反馈 信息,这在现实中往往很难实现。

2.4 人工噪声

人工噪声技术指基站端在传输 信号的同时牺牲一部分发送功率,生 成额外的干扰信号。将人工噪声对 准合法信道的零空间,该干扰信号仅 作用于窃听者,从而可以降低窃听者 的信噪比,恶化窃听信道质量,同时 不会影响合法用户间的通信。

图 8 为 5G 通信中的单基站多用 户模型。在单基站多用户通信过程 中,基站端与合法用户间进行正常的 信号传输。基站端可以分出部分功 率,向窃听者发射人工噪声干扰信 号。利用CSI设计人工噪声矩阵,并 将其投影到合法用户的零空间,可以 干扰窃听信道条件,降低窃听者信噪 比,从而使得保密容量非负,减少信



▲图8 单基站多用户模型

号泄露。

文献[11]研究了MISO毫米波系 统的物理层安全,用空间可分解路径 来表示离散角信道模型,并推导出人 工噪声方法连接概率的闭合表达式。 在保密中断概率的约束下,最大化保 密吞吐量,并获得人工噪声与信号间 的功率分配参数。文献[16]研究毫米 波车联网通信,通过混合波束成形将 信号发送给接收方,向目标方向发射 人工噪声。相比于传统向所有非预 期方向发射人工噪声的方法,该方案 可以避免向非窃听方向发送噪声。

在毫米波 MIMOSE 系统中,在窃 听者CSI未知的情况下, 文献[17]研究 基于人工噪声的混合波束成形方案。 该方案可在中断窃听者接收信息的 同时,将接收端的服务质量维持在预 期水平。

文献[18]研究了毫米波系统慢衰 落信道的安全传输,并在假设发送端 已知部分窃听CSI的情况下,提出了 基于合法用户和窃听者路径方向的 人工噪声传输策略。通过开关传输 方案,并在保密速率的约束下,最小 化保密中断概率,同时推导了传输信 号与人工噪声间最优功率分配的闭 合表达式。

基于人工噪声的安全传输技术, 并通过生成干扰信号来扰乱窃听信 道,可使得合法用户信道质量优于窃 听信道质量,从而实现物理层安全通 信。人工噪声技术适用于频分双工 (FDD)和时分双工(TDD)系统,其方 案设计需要了解精确的合法户CSI, 从而消除对合法用户的干扰。若人 工噪声方案设计不当,可能会降低合 法接收端的性能,甚至导致接收信号 峰均比增大。

2.5 天线子集选择

天线子集选择是在保证合法用

户正确解调信号的前提下,扰乱窃听 者星座图,使其接收信号的幅度相位 发生随机旋转并产生畸变,无法正确 解调信号,从而降低接收信号的信 噪比。

文献[19]提出,如果发送端能获 得合法接收端和窃听者的CSI,则可 以选择安全容量最大的一根天线来 传输信号;如果仅知道合法接收端的 CSI,则可以选择使合法信道容量最 大的天线来传输信号。文献[20]提出 一种基于点对点通信系统的低复杂 度定向调制技术。通过驱动阵列中 的一部分天线以符号速率调制辐射 方向图,在所需方向上投射出清晰的 星座图,并在其他方向上生成随机星 座图。文中,我们给出两种天线选择 算法:随机天线子集选择与模拟退火 天线子集选择。随机天线子集选择 不会影响合法用户方向接收器的符 号解调,但会随机化旁瓣方向窃听者 的接收信号幅度和相位。而基于模 拟退火的天线子集选择优化算法,可 以克服随机天线子集选择中旁瓣较 大的问题,减少能量泄漏。文献[16] 提出一种用于车联网毫米波通信系 统的物理层安全方案。在单射频链 路天线阵系统中,该方案能够随机选 择天线子集进行模拟预编码。同时, 该方案可以将信息符号发送到目标 接收器,剩余的所有天线向非目标方 向发送噪声。系统中没有闲置天线, 窃听者无法消除旁瓣失真。

天线子集选择通过控制天线的 开-关来扰乱窃听者星座图,但对合 法用户并没有影响。此方案需要以 符号速率控制开关,实现困难。

3 结束语

传统基于密码学的加密机制已 经无法满足5G通信时代下日益增长 的安全需求。PLS技术采用信号处理

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

和编码技术来增强5G移动通信系统的保密性,而不依赖于密钥的计算复杂度。安全预编码技术利用无线信道的内生安全属性,实现基于用户位置的安全传输。利用波束成形、人工降噪和天线子集选择等安全预编码方案,能够拉大合法用户与窃听者的信道容量差距,从而提高5G移动通信系统的保密性能。PLS技术与移动通信的发展密不可分,利用毫米波信道稀疏特性开发物理层安全预编码技术,有望实现5G通信与安全一体化发展。

参考文献

- [1] POPOVSKI P, TRILLINGSGAARD K F, SIMEONE O, et al. 5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: a communication-theoretic view [J]. IEEE access, 2018, (6): 55765–55779. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2872781
- [2] BLOCH M, BARROS J. Physical-layer security: from information theory to security engineering [M]. Cambridge, British: Cambridge University Press, 2011
- [3] SHANNON C E. Communication theory of secrecy systems [J]. Bell system technical journal, 1949, 28(4): 656–715. DOI: 10.1002/ j.1538–7305.1949.tb00928.x
- [4] WYNER A D. The wire-tap channel [J]. Bell system technical journal, 1975, 54(8): 1355– 1387. DOI: 10.1002/j. 1538–7305.1975. tb02040.x
- [5] BOGALE T E, LE L B. Massive MIMO and mmWave for 5G wireless HetNet: Potential benefits and challenges [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2016, 11(1): 64–75. DOI:10.1109/MVT.2015.2496240
- [6] AYACH O E, RAJAGOPAL S, ABU–SURRA S, et al. Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems [EB/OL]. [2021–06– 05]. https://arxiv.org/abs/1305.2460
- [7] CSISZAR I, KORNER. Broadcast channels with confidential messages [J]. IEEE transactions on information theory, 1978, 24(3):339– 348. DOI: 10.1109/TIT.1978.1055892
- [8] KIM C, SON J, KIM T, et al. On the hybrid

beamforming with shared array antenna for mmWave MIMO-OFDM systems [C]//2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Istanbul, Turkey: IEEE, 2014: 335–340. DOI: 10.1109/ WCNC.2014.6951990

- [9] ALKHATEEB A, AYACH OEL, LEUS G, et al. Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2014, 8(5): 831–846. DOI: 10.1109/jst– sp.2014.2334278
- [10] TIAN X W, LI M, WANG Z H, et al. Hybrid precoder and combiner design for secure transmission in mmWave MIMO systems [C]//GLOBECOM 2017 – 2017 IEEE Global Communications Conference. Singapore, Singapore: IEEE, 2017: 1–6. DOI: 10.1109/ GLOCOM.2017.8254019
- [11] JU Y, WANG H M, ZHENG T X, et al. Safeguarding millimeter wave communications against randomly located eavesdroppers [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2018, 17(4): 2675–2689. DOI:10.1109/ twc.2018.2800747
- [12] ZHANG X J, XIA X G, HE Z S, et al. Phasedarray transmission for secure mmWave wireless communication via polygon construction [J]. IEEE transactions on signal processing, 2020, 68: 327–342. DOI: 10.1109/TSP.2019.2944751
- [13] HONG Y Q, JING X J, GAO H. Programmable weight phased-array transmission for secure millimeter-wave wireless communications [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2018, 12(2): 399–413. DOI:10.1109/JSTSP.2018.2822048
- [14] VUPPALA S, BISWAS S, RATNARAJAH T. An analysis on secure communication in millimeter/ micro-wave hybrid networks [J]. IEEE transactions on communications, 2016, 64(8): 3507– 3519. DOI:10.1109/TCOMM.2016.2587287
- [15] YANG W W, TAO L W, SUN X L, et al. Secure on-off transmission in mmWave systems with randomly distributed eavesdroppers [J]. IEEE access, 2019, (7): 32681– 32692. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2898180
- [16] ELTAYEB M E, CHOI J, AL-NAFFOURI T Y, et al. Enhancing secrecy with multiantenna transmission in millimeter wave vehicular communication systems [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2017, 66(9): 8139–8151. DOI:10.1109/TVT.2017.2681965
- [17] JU Y, WANG H M, ZHENG T X, et al. Secure transmission with artificial noise in millimeter wave systems [J]. IEEE transactions on communications, 2017, 65(5): 2114–2127. DOI: 10.1109/TCOMM.2017.2672661
- [18] TIAN X W, LIU Q, WANG Z H, et al. Secure hybrid beamformers design in mmWave MI– MO wiretap systems [EB/OL]. [2021–06– 21]. https://ui. adsabs. harvard. edu/abs/

2020ISysJ..14..548T/abstract

- [19] ZOU Y L, ZHU J, WANG X B, et al. Improving physical-layer security in wireless communications using diversity techniques [J]. IEEE network, 2015, 29(1): 42–48. DOI: 10.1109/MNET.2015.7018202
- [20] VALLIAPPAN N, LOZANO A, HEATH R W. Antenna subset modulation for secure millimeterwave wireless communication [J]. IEEE transactions on communications, 2013, 61(8): 3231– 3245. DOI:10.1109/TCOMM.2013.061013.120459



商志彪 等



Nature Flow:新转发架构赋能 未来数据中心网络

Nature Flow: A New Forwarding Architecture Improves Future Data Center Network

摘要:提出一种基于端□地势值比较的数据转发新技术──Nature Flow。该技术不仅能有效确保二层数据无环路转发,而且能提升数据中心网络开放能力。新转发架构的价值在于构建大规模 二层拓扑存环网络的无环转发能力、对应用程序开放网络端到端的距离感知能力、网络故障快速 收敛和自愈能力、网络拥塞时的流量自主调优能力等。新转发架构有望变革现有技术,助力未来 数据中心网络建设。

关键词: Nature Flow; 端□地势值比较; 无环路转发; 自愈能力; 端到端距离感知; 流量自主 调优

Abstract: A new data forwarding technology Nature Flow based on the comparison of port terrain values is proposed, which can effectively ensure the no-loop forwarding of layer 2 data and improve the network opening ability of the data center. The value of the new forwarding architecture lies in the following aspects: the acyclic forwarding ability of large-scale two-layer network with topological rings, the end-to-end distance perception ability for the application in open network, the rapid convergence and self-healing ability of network failure, and self-tuning ability of traffic in network congestion. The new forwarding architecture is expected to change the existing technology and help the future data center network construction.

Keywords: Nature Flow; port terrain value comparison; no-loop forwarding; self-healing ability; end-to-end distance sensing; traffic self-tuning

商志彪 /SHANG Zhibiao¹ 雷波 /LEI Bo² 郭茜 /GUO Xi^{3.4} (1. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057; 2. 中 屈 由 左 即 公 司 田 容 院

 中国电信股份有限公司研究院, 中国北京102209;
 北京科技大学,中国北京100083;

- 3. 北京科技大学, 屮国 北京 100083; 4. 北 京 市 材 料 知 识 工 程 重 点 实 验 室,
- 4. 北 京 巾 M 料 知 识 丄 桯 中国 北京 100083)
- (1. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;
- 2. Research Institute of China Telecommunications
- Corporation, Beijing 102209, China; 3. University of Science and Technology Beijing,

Beijing 100083, China;Beijing Key Laboratory of Knowledge Engineering for Materials, Beijing 100083, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202104012 网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/ detail/34.1228.tn.20210421.1751.002.html

网络出版⊟期:2021-04-22 收稿⊟期:2020-09-26

1. 新转发架构 Nature Flow 概述

1.1 传统 L2 转发原理

体上,数据中心需要一个二层 网络。传统的二层转发通过报 文中的目的媒体接入控制(DMAC)、 虚拟局域网(VLAN)、PORT(计算 机端口)信息查表来确定报文的出端 口,并完成源媒体接入控制(SMAC) 的学习。除了出端口信息外,所查表 项结果几乎不包含其他可有效指导网 络报文转发的全局性信息。二层数据 报文一旦遇到拓扑环路,将会造成"环 路风暴",整个报文转发系统将面临 崩溃。

1.2 Nature Flow 转发架构

Nature Flow 转发架构是一种全新 的转发与控制体系。它在每个转发设 备端口上设置逻辑地势值,并在报文 转发时通过比较该值来判断和选择转 发出口。Nature Flow 可实现二层数据 包无环路转发。这种在转发中去除环 路的方式与现有的生成树协议(STP)^{III} 完全不同。STP 的目标是建立拓扑无 环网络,而新转发架构的目标是在拓 扑存环的网络中完成无环路的二层数 据转发。拓扑环路可以有效提升整体 网络的可靠性,而转发环路的存在是 导致网络中出现"环路风暴"的根本 原因。 三层路由转发可实现数据流在拓 扑存环网络上的无环路转发。Nature Flow转发架构也是一种新型的二层路 由转发协议,在一定程度上可以通过 对现有地址解析协议(ARP)/邻居发 现协议(ND)等的改造来初步实现。

Nature Flow 转发体系的构建大致 包括两个阶段:

(1)分布式地势图的构建

媒体接入控制(MAC)地址的拥 有端通过一种全新方式向整个网络发 布该 MAC 地址的网络转发地势值,该 值被记录在途经的每个网络设备的每 个端口上。针对固定的某个端口,该 值等于端口到 MAC 地址所需经历的端 到端的网络距离。当该 MAC 地址的地 势值在全网发布完成时,一个类似"等 高线"形态的全网络的分布式地势值 分布图将会形成。

(2)数据转发依地势高低进行自 然流动

在地势分布构建完成之后,转发 规则的设计变得非常简单。参照自然 界中水自然流动的原理,建立只允许 数据报文从高地势值向更低地势值的 转发规则,以确保每转发一次的地势 值都比之前路径节点的地势值低。在 这种条件的约束下,整个转发路径中 的环路就不会形成。如果转发设备中 存在多条更低地势的转发路径,就选 取对应地势最低的那一条。

1.3 新概念:端口地势值和全播过程

地势值是 Nature Flow 转发架构下 的新概念。设备的每个转发端口都具 有一个或者多个针对某个目的 MAC 的 地势值。该值被记录在 MAC 查找结果 表中,并在转发时被用来比较权衡。 端口地势值记录的是从该端口到达特 定目的 MAC 优选路径上的全部链路在 某一种链路属性上的累加和。该累加 和同时也表示,在某种属性下,该端 口到达目的 MAC 的网络距离。以跳数 (HOP)作为链路属性为例,假设某 端口到达目的 MAC 的累加和为 3,则 从该端口转发数据包到目的 MAC 接收 端共有3跳的网络距离。在新转发架 构下,链路属性有多种,如HOP、时延、 可靠性等。该属性需要具有随链路增 加而累加增大的特征。同一个端口对 不同目的 MAC 会有不同的地势值。整 个网络中每个设备的每个端口针对相 同目的 MAC 也会有不同的地势值。这 是新架构与传统 MAC 表中数据结构最 大的不同, 也是新转发架构得以实现 更高网络能力的基础。

全播是 Nature Flow 转发架构下

构建网络地势分布的过程, 也是在地 势转发网络中对传统广播过程的有效 替代。全播的发起者是 MAC 地址的 拥有者, 也是设备转发表项中的目的 MAC 端。发起者通过全播过程在全网 中建立 MAC 地址的地势值分布。与广 播和组播过程不同,在传播过程中全 播会在报文中携带地势值,并且在每 次设备转发时修正报文中的地势值。 假设针对某个转发系统,即在同一个 VLAN 或者虚拟网络标识(VNI)内, 存在A、B、C、D共4个端口。由A 口收到地势值为1的某个 MAC 地址的 全播报文,在转发时会向 B、C、D 口 转发地势值为2的全播报文。上述转 发行为是以 HOP 为地势的参考属性。 针对来自相同 MAC 地址的全播报文, 中间转发设备会自主记录来自不同入 端口的地势值,并只会向远端传播当 下最小地势值的全播报文(其他地势 值对应的路径均作为本地备份路径)。 这种传播方式可以有效地减少报文的 传播次数,同时也避免了报文的环路 传播。

以 HOP 为链路属性参考,全播 过程使网络中每个端口均记录到达该 MAC 的最优"生存时间(TTL)值"。 同时这个传播过程是随时可以扩展的, 更适合链路的动态变化的场景。如图 1 所示,该图以 MAC 节点 A 完成基于 跳数的全播过程来说明整个转发控制 过程。

在 Nature Flow 转发系统中,假 设网络中存在末端系统(ES)节点和 中间系统(IS)节点。图1中橙色的 圆点表示 ES节点,即具有 MAC 地址 的实体,是全播的发起者。ES节点对 应每个应用程序(APP)或者主机的 MAC 地址,具有转发表项和协议栈能 力,同时也是全播的终结点。图1中 蓝色八边形表示 IS 节点,即整个网络 中的数据转发设备,如交换机或者路 由器,是全播的转发节点和地势值累 加节点。

每个 ES 节点需要向全网全播自己 的 MAC 地址,以使得网络中其他节点 获得相应的的网络距离和出端口信息。 反之,在接收其他节点发送过来的全 播报文时,ES 节点也获得去往该节点 的出口信息和网络距离信息(记录在 全播报文中的经过无数次累加之后的 地势值)。作为全播报文的发起者, ES 节点发送出去的初始全播报文的地 势值是最低的。以 HOP 为例,如果在



▲图1 全播过程地势分布示意图

技术广角

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

全播报文中设置 HOP=1, 那么以后每 被设备转发一次则加1。

假设图1中所有的节点和路径都 处于同一个转发系统(即VLAN)中, 以IS节点A为例,当IS收到HOP=1 的来自 MAC A 的全播地势信息时,转 发系统内有 3 个端口: 连接 MAC A 的 端口、连接节点 B 的端口、连接节点 D的端口。根据水平分割原理,出端 口为节点 B 和节点 D 的方向。网络设 备在向下转发全播时,需要在报文的 当前地势值中累积增加从节点 B 到节 点 A (或者从节点 D 到节点 A)的地 势差值,然后将修改后的全播报文发 送给节点 B 和节点 D。图 1 中的数字 表示的是,在整个全播过程完成后各 个节点的端口以跳数为参考的地势值 分布,其中节点 C 和节点 E 都会收到 两个地势值。然而,设备只把最低的 地势值3累加后向外传播,并将更大 的地势值作为本地备份链路使用。同 一个 MAC 地址通过全播的方式不断扩 散,并在整个网络中形成一种类似"等 高线"的地势分布。该地势分布为反 方向的数据转发以提供路径指导。图 1的拓扑结构存在环路。节点C和节 点 E 可以同时存在两个转发地势值, 并形成转发出口的主备关系。不同的 出口对应不同的到达MACA的路径(图 1中我们以绿色字体和黑色字体进行 区别)。

1.4 Nature Flow 架构下的设备转发规则

Nature Flow 转发系统与传统的转 发规则完全不同。传统转发规则中的 MAC 结果表中不记录地势值信息, 只记录出接口信息。传统转发规则只 能查找到特定的出口,进而完成数据 的转发,并不适应网络的拓扑变化。 Nature Flow 通过全播建立基于自身 MAC 的整网出端口地势值分布,使得 转发数据流量可以像自然界中水流一 样在整个基于地势分布的网络内流动。 这也是新的转发架构被命名为 Nature Flow 的原因。

假设存在网络转发设备 M, 从 A 端口进入的目的地址为 MAC X,转发 系统为 VLAN Y 数据流量,那么设备 转发规则为:

(1) FIND 端口组 {O} IN VLAN Ywhere DMAC=MAC X 且端口 i 的地势小于端口 A 的地势;

(2)最优出口 i=MIN{ 端口 i 地势 } where i in 端口组 {0}。

依据转发规则,系统在第1步寻 找全部可用的无环路转发端口组,在 第2步寻找端口组中最优转发路径的 出端口,以实现到达目标节点网络距 离最小的出口路径转发。在链路发生 变化时,这种转发方式可以有更多的 转发路径选择,并具有更高的鲁棒性。 除此之外,第2步的最优出口策略也 可以进行调节。比如,在发生出口拥 塞时,如果所转发的报文没有保序要 求,那么第2步就可变更为寻找最大 剩余带宽的路径出口,以更好地自主 规避网络拥塞。

2 Nature Flow 架构网络的潜在 应用价值

2.1 大规模网络二层数据转发中去除环 路的能力

在数据网络中,无论是三层路由 协议还是二层转发都面临环路转发问 题。以开放式最短路径优先(OSPF)^[2] 和边界网关协议(BCP)^[3]为例,OSPF 区域内通过最短路径优先(SPF)算法 实现无环路路由,OSPF 区域间通过强 制与骨干区域连接实现去环。外部边 界网关协议(EBGP)通过自治区域路 径信息(AS-PATH)属性的序列检查 来实现防环,内部边界网关协议(IBCP) 通过限制路由学习来实现无环。Nature Flow 以基础的二层转发架构为起点, 它去除环路的原理主要通过转发地势 值的持续递减来实现,即数据流的每 次转发行为都会使该地势值降低一 次。这样地势值就不可能回到原来的 高度,也就无法形成闭合的网络转发 环路。该技术打破当前二层网络必须 部署在树形网络拓扑上的限制,可以 实现规模更大、拓扑更加复杂的二层 网络。在超大规模数据中心组网实践 中,基于距离向量的路由算法具有更 小的网络状态同步需求,并逐渐在诸 如 FaceBook 设计的 F4^[4] 和 F16 数据中 心 Fabric 架构下使用。同时为了方便 大规模网络的运维和管理,超大规模 数据中心更倾向于使用单一的路由协 议^[5]。Nature Flow 能够很好地满足上 述条件。当二层网络不再受广播风暴、 规模等问题限制时,数据中心网络的 发展将迎来新的机遇。

2.2 应用程序对网络端到端距离的感知 能力

在现有的数据中心网络系统中, 信息技术(IT)系统负责发送和接收 数据报文,通信技术(CT)系统负责 转发数据报文。然而,IT系统和CT 系统之间的深度交互却是有限的。这 给整个系统业务的故障定位带来很大 的困难,比如涉及业务软件系统的传 输控制协议(TCP)时间超时等故障 问题。

在 Nature Flow 转发系统中,每个 ES 节点都会记录目的 MAC 端的累积 地势值,即到达目的 MAC 的网络距 离。如图 2 所示,以跳数为例,假设 数据通信发生在 MAC A 和 MAC B 之 间,那么在故障发生之前,MAC A 设 备上记录 MAC B 的以 HOP 为参考的 地势值为 3。当故障发生后,网络会 动态收敛并更新地势值,MAC A 设备 上记录 MAC B 的以 HOP 为参考的地 势值会变成5。此时, MACA设备可 以通过这种变化感知到网络状态也发 生了变化。如果 HOP 变成 5 之后不可 接受,那么应用软件可以更灵活地进 行判别与处理。在新架构下,应用程 序可通过对本地目的 MAC 表中的地势 值的查询来发现网络的变化, 以提升 应用程序对网络的感知能力。与此同 时,网络也向应用开放端到端的网络 距离感知能力。在传统的网络中,应 用无法感知网络的变化和具体状态, 只能通过应用层的超时异常来报告网 络故障。类似Ping的运维手段也无法 反映图 2 中的网络变化过程差异。新 转发架构的这一开放能力,将在云计 算与网络技术的融合中带来巨大的商 业价值。IT 系统可以查询到达目标网 络的端到端距离,可更好地感知网络 的变化,从而更好地规划如何使用网 络来打造更优质的云平台,实现网端 入云和云端知网的信息通信技术(ICT) 融合,助力运营商打造更优质、更开 放的网络新平台。以当前的内容分发 网络(CDN)业务为例,新转发架构 可以使业务通过判断不同缓存节点到 达目标互联网协议(IP)的网络距离 来选择最近的缓存节点,而不是只能 依靠固定物理地址与固定 IP 的对应关 系来计算远近距离。其中,后者只是 算法的能力,而不是网络的开放能力。

同时后者仅粗略地估计距离,在时延 方面的应用比较有限。

2.3 网络弹缩的快速收敛及自愈能力

任何转发和路由算法都需要面对 网络中设备和链路的动态增删。在动 态增删过程中,快速收敛特性是整个 算法的核心优势。在 Nature Flow 转发 系统中,链路的增删会带来局部多个 MAC 地址的地势值变化,并需要触发 对前期全播过程的扩展。当整个扩展 的全播过程完成时,新的转发地势分 布就会形成,整个网络的快速收敛也 将实现。

网络的变动情况大体上分为两类: 网络链路的增加和网络链路的删除。 网络中整台网络设备的增减可以映射 为多条网络链路的变动。

在 Nature Flow 系统中,如果增加新的链路,新链路两端的节点设备 在感知到网络发生变化后,会针对本 地 MAC 表中具有相同转发系统(即 VLAN)的条目,在新链路上启动新的 地势分布的全播。该过程不仅实现向 新增链路的两个端口发送本地最优地 势值的全播报文,还实现新增接口针 对转发系统内全部 MAC 的地势值的分 布。此外,如果出现新增链路接口的 地势值低于设备原有地势值的情况, 就需要把新的最小的地势值继续通过



▲图 2 末端系统节点对目标节点的地势感知示意图

全播的方式向远端传递。

在 Nature Flow 系统中, 假设原有 链路可被删除,包括链路故障或者节 点故障等情况。在删除前的全播过程 中,如果该链路作为最优路径被选中, 则需要向原来的该链路全播方向发送 一种全新的全播链路删除报文,以告 知整个路径中的节点删除转发表项中 早期通告过的针对某个 MAC 地址的地 势值,并重新选择最小的地势值路径。 全播链路删除报文需要扩散至整个故 障链路以下的全部网络节点和主机节 点。如果在前期的全播传播中, 被删 除的链路只作为备份路径使用,那么 只需要在 MAC 转发表中删除原有的备 份表项,同时通过全播扩展过程只在 备份链路上通告删除备份路径的相关 表项。

在整体算法设计上,链路的动态 增删只涉及原有全播过程的扩展和修 正。全播报文传递完成意味着对应的 网络收敛过程的完成。与传统网络中 的双向转发检测(BFD)和快速重路 由(FRR)过程相比,新的转发框架 可以有效实现网络的自愈,能够更好 地应对网络的故障收敛。

Nature Flow 转发框架是为未来数 据中心动态网络而设计的。如果网络 中的某条链路属性发生变化, 整个网 络中基于该属性的地势分布的变化也 可能会被触发。通常情况下,以HOP 为参考的属性不易发生变化,可以作 为 Nature Flow 的基础属性。然而,以 时延为参考的链路属性却常常是动态 变化的。如果某一条链路时延属性的 变动超出一定范围,就需要通过全播 来重新发送到全网。该实现过程与链 路的增删类似。如果某条链路的时延 属性变大,那么需要删除原来的低时 延全播通告,同时完成新的更大时延 的全播通告:如果某条链路的时延属 性变小,就需要删除原来较大的时延

技术广角

全播通告,同时完成新的较小时延的 全播通告。

如图 3 所示,我们对每个 IS 设备 的端口进行详细命名。命名规则为: 以向上为1开始,并沿顺时针方向递 增。在全播过程完成后,各设备的转 发表项状态如表1所示。转发设备可 以根据目的 MAC、转发系统、入端口 来查找整个表项,并找到有效的出端 口。例如,当主用出口发生故障时, C1和C2这类具有备用出口的转发就 需要网络设备感知到故障,并删除当 前的最优路径。主路径删除后,再次 查询时备用路径就会被作为最优的转 发出接口,完全不需要 FRR 过程和拓 扑无环备份(LFA)保护,这具有在 大规模数据中心网络中应用的潜力。

2.4 路径资源占用的拥塞调度与自主调 优能力

针对数据中心网络, 网络流量模 型具有一定的突发性和动态性特征。 网络链路利用率的不均衡调节和拥塞 控制调节就变得极为重要。在高性能 计算(HPC)网络和分布式存储网络中, 应用对丢包极为敏感。例如,1%的丢 包可能会造成极为重大的性能损失。 这就需要网络在整体上构建路径拥塞 控制调节机制,以尽可能减少网络拥 塞造成的丢包^[7]。继 DCQCN (数据中 心 QCN) 之后, 2019 年阿里巴巴集团 提出高精度拥塞控制(HPCC)算法^[8], 通过在 TCP 协议的确认字符(ACK) 报文中增加拥塞控制标识来完成有效 的端点发送流量控制,并通过有效调 节应用发送端的流量大小来规避进一 步的拥塞。但是对于网络内部由其他 流量对共享链路资源的争用所带来的 拥塞, 仅通过该算法在发送端调节流 量是不能彻底地解决这一问题的。本 文所提出的 Nature Flow 算法可以有效 地解决此类链路拥塞问题,并实现对



▲图3网络中各设备节点接口分布

▼表1 全播过程完成后,各设备的转发表项状态

	目的节点	转发设备	出端口	出口地势	入端口	转发系统	
	MAC-A	SW-C	C4	3	C1	VLAN1	
	MAC-A	SW-C	C4	3	C2	VLAN1	
	MAC-A	SW-C	C4	3	C3	VLAN1	
	MAC-A	SW-C	C3	4	C4	VLAN1	
	MAC-A	SW-C	C3	4	C1	VLAN1	
	MAC-A	SW-C	C3	4	C2	VLAN1	

MAC-A: 媒体接入控制A SW-C: 转发设备 C VLAN: 虚拟局域网

拥塞控制的自主优化调度。

Nature Flow 架构的转发设计在拥 塞控制方面具有如下可行方案:

(1) 当整体网络中存在软件定义 网络(SDN)控制器等全局统一管控 平台时,如果某条链路发生拥塞,就 可以针对该链路中占比较大的拥塞流 量, 调高该端口针对该条流量的地势 值。该地势值的变动会重新触发整个 网络的地势变化和局部重新选路, 使 得部分流量绕行拥塞链路。

(2) 如果在最优路径转发时仍然 出现链路拥塞, Nature Flow 则有能力 调节转发选路策略。比如,针对无严 格保序要求的报文,如用户数据报协 议(UDP)报文, Nature Flow 不再按 照最优路径转发, 而是在全部无环转 发路径组中选择当前剩余带宽最大的 路径,以避免进一步加剧拥塞。

(3) 当某条链路发生拥塞时,基 于 Nature Flow 的转发架构具有链路增 删的快速收敛能力,可以在拥塞链路 的局部增加对应转发系统的链路。其 他转发系统的链路也可以被临时借用 到拥塞链路的流量转发上,并在拥塞 解除后被重新还原,以实现网络架构 对拥塞的动态应对。

与传统路由协议和二层转发相比, Nature Flow 转发架构在全网络所有设 备的 MAC 表项中分布式地记录网络距 离(即地势值)的全局性信息。相比 于当前的链路状态算法,如 OSPF 和

ISIS 等,该架构使用全局性信息来指导网络流量转发,具有更优的网络动态适应性。

Nature Flow 在网络流量工程调节 方面也具有综合优势,尤其是在与未 来网络 SDN 控制器及人工智能(AI) 技术的结合方面。全播过程使每个 MAC 地址都有一张网络地势分布图, 可以有效指导网络路径转发,规避无 环路和拥塞。更重要的是,通过 SDN 控制器或者 AI 技术来优化和调节这些 地势值,可以实现对整个网络流量的 精准调度与控制。

3 对新转发架构的思考

3.1 Nature Flow 新架构给现有设备带 来的改变

新转发架构改变了整个二层 MAC 数据流的转发规则,给整个网络能力 的开放带来新的机会与挑战。新架构 可以解决当前网络所面临的诸多难题, 但同时也对转发设备提出新的要求。 Nature Flow 新转发架构的实现会给网 络设备带来如下需求:

(1) MAC 转发表项的数据结构 变化

Nature Flow 转发架构改变了底 层目的 MAC 转发表的数据结构,在 MAC 转发表中增加了一个或多个基于 属性的地势值。这种改变增加了 MAC 转发表项的大小,但并未增加 MAC 转发表项的大小,但并未增加 MAC 表项的条目需求。MAC 表项的条目增 加仅仅是备份链路的增加,它可以解 决传统 MAC 飘逸等带来的相关问题。 MAC 学习和 MAC 老化都是由整个全 播过程来完成的。在当前的网络协议 中增加全播能力并不是一件困难的事 情。具体的全播过程可以在现有网络 上通过免费 ARP 等相关技术的改造来 实现。

(2)设备转发逻辑和算法的创新

基于地势的全播过程创新地打造 一组针对目的 MAC 地址的无环路转发 路径。相关路径信息被分布式地记录 在设备的转发表项中。由于有地势值 的指导, Nature Flow 转发逻辑路径选 择的空间更大,优选路径的策略更多, 可以实现更高效的数据流量工程能力。 此外, 与实现 IP 路由的参数化模块库 (LPM) 查找类似, 网络设备也需要 比原来传统转发逻辑更加复杂的算法。 新的转发逻辑虽然可以在纯软件的基 础上实现,比如将地势转发逻辑构建 在基于软件的 MAC 路由信息表(RIB) 中,真实的报文转发依然由传统的转 发芯片来承担。更近一步地,如果能 够在芯片层面实现对新的转发架构逻 辑的支持,就有可能打造出新的数通 转发设备,如白盒设备等。

(3) 全播报文的控制与对账

新转发架构建立在整个网络的全 播过程上,取代了传统的泛洪式转发。 由于需要建立高效的全播地势分布, 整个网络中全播流量的带宽需求会比 传统网络有所提升。在某些高动态网 络中,新增链路和删除链路带来的全 播流量会增加。当然,这种增加是相 对于传统转发环境而言的。如果考虑 整个网络接口的带宽,那么从最早的 1 GE 增长到目前的 10 GE 和 25 GE, 带宽需求的占比可能并未增加。在理 论上,如果需要构建一个高效的动态 管理路由网络,控制层面的流量与接 口带宽的比例必须是合理的, 以避免 1 GE 带宽的网络和 10 GE 带宽的网络 使用同样带宽(如 500 Mbit/s)的管理 和控制流量。全播过程的安全控制最 好由 SDN 控制器来完成。控制器是全 局信息的拥有者,完全可以实现对整 个网络地势分布的实时控制和一致性 对账,并提供更高的网络稳定性和一 致性,进而打造软件可控的未来数据 中心网络。

3.2 Nature Flow 应用场景与未来目标

新的转发架构更适用于数据中心 的超大规模组网,能够实现网络规模 和链路的动态弹缩。在与云计算技术 融合方面,新的转发架构可以把网络 的端到端基础能力开放给软件应用, 使得软件程序在通信发起时可初步预 测"信息"被送达的情况,比如需要 多少跳网络,或者需要多少时延等。 这种开放能力不仅有助于提升软件应 用感知能力和应用网络平台能力,还 能提高网络运维和排障效率。网络转 发端到端能力的开放更适合打造面向 未来的确定性网络。与当前应用程序 需要网络具有端到端确定性保障不同, 端到端能力开放(或可感知网络)把 整体网络视作一个动态过程,并由 IT 软件的应用程序来判断网络的确定性。 例如,当信息在3跳之内或者3s之内 可达时,成功的概率在90%以上。不 同于当前的基于报文复制和副本消除 的确定性网络解决方案,新的转发架 构把网络基础能力的选择权交给应用 端,同时网络本身只致力于提供更低 时延、更大带宽等技术指标。该转发 架构更适用于网络分片技术和网络流 量工程的精细化管控。当 MAC 表多记 录一种不同链路属性的地势值时,整 个转发层就会提供一种基于该链路属 性的分片转发能力。在 5G 的切片转发 应用中,带宽敏感流量可以通过基于 HOP 的地势转发实现,时间敏感流量 可以在基于时延的地势转发中实现。 针对同一个物理网络、同一个目标地 址,当应用所需要的网络指标不同时, 支持 Nature Flow 的转发系统可以实现 不同路径的路由转发处理。

新转发架构的最大贡献在于从根本上解决了网络环路转发的问题。虽然在极端情况下仍然存在环路的可能, 但是当新转发架构配合 SDN 控制器构建整个网络时,通过控制器层面的 技术广角

商志彪 等

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

基于全局算法的防环路补充机制,可 以彻底地解决环路问题。虽然新转发 架构的目标在于为二层网络设计,但 是其防环路的原理完全可以被其他三 层路由协议所借鉴,如路由信息协议 (RIP)等。由于在控制和转发之间只 使用全局分布式的地势值,新转发架 构更适合在 SDN 控制器上引入 AI 算 法,也更适合作为未来白盒设备的基 础转发规则,同时还可以对原生 SDN^[9] 系统的 Openflow 流表做更深入的改进。

Nature Flow 转发架构是一种新的 转发与控制的框架体系。相比于传统 转发架构,Nature Flow 可实现设备整 体转发规则的高度统一和全网分布式 差异化地势的分布,通过分布式的设 备算力降低整个网络中 SDN 控制器的 负担^[10],可以打造更大规模、更精准 的流量控制数据中心网络,具有变革 当前数据中心网络的潜力。

在某种程度上, Nature Flow 是一 种基于 MAC 的二层路由内部网关协议 (IGP)算法,可实现对单播路由的无 环路计算,并在新框架中使用全播来 替代传统的广播转发。Nature Flow 的 组播或可通过配合最新的 BIER (基于 比特索引的显示组播复制)协议来实 现。引入 Nature Flow 会给数据中心网 络带来新的变化和需求,比如对带内 遥测技术(INT)的需求。Nature Flow 需要 INT 来获取每条链路的不同维度 的属性值,如丢包、时延等。此外, Nature Flow 可以实现高效的网络自愈 和流量自主调优。在这种情况下,数 据转发路径相对不完全固定,这对数 据中心的运维和排障能力提出新的要 求,对流量可视化、历史流量转发路 径确认等的需求更为迫切。此外,当 前数据中心大多使用基于 Overlay 的虚 拟扩展局域网(VXLAN)等相关技术。 Nature Flow 与 VXLAN 的结合必然会在 Overlay 层实现这使得 Overlay 层的应

用程序可以感知到到达通信对端的"网络距离",从而把网络层的基础能力 开放给平台层和应用层,有助于实现 ICT技术的深度融合与综合提升。诸 如VXLAN、SRv6等Overlay技术本质 上是基于隧道实现的远程连接。Nature Flow虽然在设计时是将链路作为承载 流量的基本元素,但是完全可以平滑 扩展到向支持链路一样来支持隧道。 该方法把隧道看成一种基于Overlay的 特殊链路,实现了与当前数据中心主 流协议的结合。

4 结束语

Nature Flow 转控架构基于自然界 水流的无环路流淌,为每个设备的端 口引入地势值的新概念。网络转发路 径的构建过程以创新的全播过程来实 现,转发出口选择转换为对应出口地 势值的比较结果。新架构转发表中记 录的地势值,为应用程序对网络的端 到端距离感知提供基础能力,也为网 络动态变化时路由快速收敛和拥塞控 制提供指导和支撑。新架构能够有效 提高现有网络的基础能力,更适用于 未来大规模高动态数据中心网络的建 设。我们希望产业界、学术界的研究 者能够关注 Nature Flow 这一新技术, 对其做进一步研究,以解决当前网络 所面临的诸多问题,进而推动未来网 络的变革。

参考文献

- IEEE. Local and metropolitan area networks: media access control (MAC) bridges: 802.1D–2004 [S]. 2004
- [2] IETF. OSPF version 2: RFC 2328 [S]. 1998
- [3] IETF. A border gateway protocol 4 (BGP-4): RFC 4271 [S]. 2006
- [4] 马绍文, 超大规模云网络数据中心创新 [EB/OL]. (2020-04-21)[2021-04-10]. https://www.sdnlab.com/24039.html
- [5] IETF. Use of BGP for routing in large-scale data centers: RFC 7938 [S]. 2016

- [6] ROY A, ZENG H, BAGGA J, et al. Inside the social network's (datacenter) network [C]//Proceedings of the 2015 ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication. New York, NY, USA: ACM, 2015: 123–137
- [7] 王江龙, 雷波, 解云鹏, 等. 云网一体化数据中心 网络关键技术 [J]. 电信技术, 2020, 36(4): 125– 135
- [8] LI Y, MIAO R, ZHANG M. Hgh precision congestion control [EB/OL]. [2021–04–10]. https:// dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3341302.3342085
- [9] MCKEOWN N, ANDERSON T, BALAKRISHNAN H, et al. OpenFlow: enabling innovation in campus networks [EB/OL]. (2008–04)[2021–04–10]. http://www.sigcomm.org/node/2683
- [10] 邬贺铨.关于5G的十点思考[J].中兴通讯技术, 2020, 26(1): 2-4. DOI: 10.12142/ZTETJ.202001002



《中兴通讯技术》杂志(双月刊)投稿须知

一、杂志定位

《中兴通讯技术》杂志为通信技术类学术期刊。通过介绍、探讨通信热点技术,以展现通信技术最新发展动态,并促进产 学研合作,发掘和培养优秀人才,为振兴民族通信产业做贡献。

二、稿件基本要求

1. 投稿约定

(1)作者需登录《中兴通讯技术》投稿平台:tech.zte.com.cn/submission,并上传稿件。第一次投稿需完成新用户注册。

(2) 编辑部将按照审稿流程聘请专家审稿,并根据审稿意见,公平、公正地录用稿件。审稿过程需要1个月左右。

2. 内容和格式要求

(1)稿件须具有创新性、学术性、规范性和可读性。

(2)稿件需采用 WORD 文档格式。

(3)稿件篇幅一般不超过6000字(包括文、图),内容包括:中、英文题名,作者姓名及汉语拼音,作者中、英文单位, 中文摘要、关键词(3~8个),英文摘要、关键词,正文,参考文献,作者简介。

(4)中文题名一般不超过20个汉字,中、英文题名含义应一致。

(5)摘要尽量写成报道性摘要,包括研究的目的、方法、结果/结论,以150~200字为宜。摘要应具有独立性和自明性。 中英文摘要应一致。

(6) 文稿中的量和单位应符合国家标准。外文字母的正斜体、大小写等须写清楚,上下角的字母、数据和符号的位置皆应 明显区别。

(7)图、表力求少而精(以8幅为上限),应随文出现,切忌与文字重复。图、表应保持自明性,图中缩略词和英文均要 在图中加中文解释。表应采用三线表,表中缩略词和英文均要在表内加中文解释。

(8)所有文献必须在正文中引用,文献序号按其在文中出现的先后次序编排。常用参考文献的书写格式为:

•期刊 [序号] 作者 . 题名 [J]. 刊名, 出版年, 卷号 (期号): 引文页码. 数字对象唯一标识符

·书籍[序号]作者.书名[M].出版地:出版者,出版年:引文页码.数字对象唯一标识符

·论文集中析出文献 [序号]作者.题名 [C]//论文集编者.论文集名 (会议名).出版地:出版者,出版年 (开会年):引文页码.数字对象唯一标识符

·学位论文[序号]作者.题名[D].学位授予单位所在城市名:学位授予单位,授予年份.数字对象唯一标识符

・专利 [序号]专利所有者.专利题名:专利号 [P]. 出版日期. 数字对象唯一标识符

·国际、国家标准[序号]标准名称:标准编号[S].出版地:出版者,出版年.数字对象唯一标识符

(9)作者超过3人时,可以感谢形式在文中提及。作者简介包括:姓名、工作单位、职务或职称、学历、毕业于何校、现 从事的工作、专业特长、科研成果、已发表的论文数量等。

(10)提供正面、免冠、彩色标准照片一张,最好采用 JPG 格式(文件大小超过 100 kB)。

(11) 应标注出研究课题的资助基金或资助项目名称及编号。

(12)提供联系方式,如:通讯地址、电话(含手机)、Email等。

3. 其他事项

(1) 请勿一稿多投。凡在2个月(自来稿之日算起)以内未接到录用通知者,可致电编辑部询问。

(2)为了促进信息传播,加强学术交流,在论文发表后,本刊享有文章的转摘权(包括英文版、电子版、网络版)。作者获得的稿费包括转摘酬金。如作者不同意转摘,请在投稿时说明。

- (3)编辑部地址:安徽省合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 1201 室,邮政编码: 230061。
- (4) 联系电话: 0551-65533356, 联系邮箱: magazine@zte.com.cn。

(5)本刊只接受在线投稿,欢迎访问本刊投稿平台: tech.zte.com.cn/submission。



办刊宗旨:

以人为本, 荟萃通信技术领域精英 迎接挑战, 把握世界通信技术动态 立即行动, 求解通信发展疑难课题 励精图治, 促进民族信息产业崛起

产业顾问(按姓名拼音排序): 段向阳、高 音、胡留军、刘新阳、 陆 平、史伟强、王会涛、熊先奎、 朱 方、朱晓光

双月刊 1995 年创刊 总第 159 期	总编辑:王喜瑜
2021年8月 第27卷第4期	主编:蒋贤骏
	执行主编:黄新明
	责任编辑:徐烨
主管: 安徽出版集团有限责任公司	编辑:杨广西、卢丹、朱莉、任溪溪
主办:时代出版传媒股份有限公司	设计排版:徐莹
深圳航天广宇工业有限公司	发行:王萍萍
出版:安徽科学技术出版社	外联:卢丹
编辑、发行:中兴通讯技术杂志社	编务:王坤

《中兴通讯技术》编辑部 地址: 合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 1201 室 邮编: 230061 网址: tech.zte.com.cn 投稿平台: tech.zte.com.cn/submission 电子信箱: magazine@zte.com.cn 电话: (0551)65533356 传真: (0551)65850139
发行方式: 自办发行
印刷: 合肥添彩包装有限公司
出版日期: 2021年8月10日
中国标准连续出版物号: <u>ISSN 1009-6868</u> CN 34-1228/TN
定价: 每册 20.00 元