

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, train-to-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

DOI: 10.12142/ZTETJ.202104005

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20210722.1439.008.html>

网络出版日期: 2021-07-22

收稿日期: 2021-06-28

高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

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

基金项目:国家自然科学基金(61661025、61661026)

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,包括自动驾驶、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1 Gbit/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1 000倍的容量。

(3) 5G-R

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。

2 5G-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

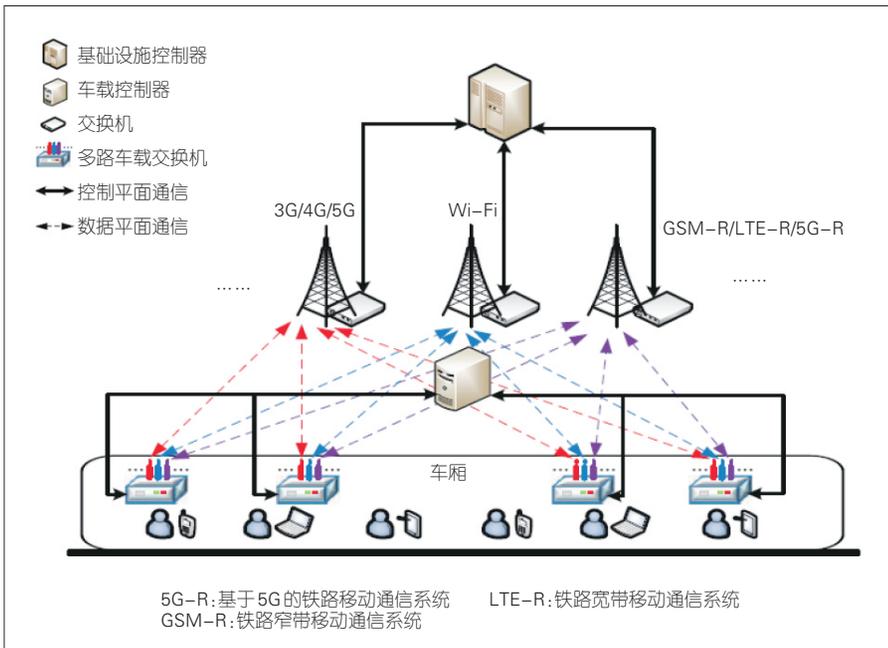
GSM-R共存,其中GSM-R负责传输安全信息与列车调度和控制有关的数据,而LTE-R负责传输其他非安全数据;(2)LTE-R完全取代GSM-R,同时,5G-R将逐步负责列车间的应急通信及车厢内旅客的互联网接入业务;(3)5G-R得到部署,不仅能提供每秒吉比特的数据速率和毫秒级的系统延迟,还可提供智能铁路相关业务。在很长的一段时期内,HSRs移动通信系统将呈现异构化,以满足智能铁路各种应用场景的通信需求,包括T2I、T2T和RIoT通信等。

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GSM-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):

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

其中, B^m 、 D^m 、 J^m 、 P^m 、 E^m 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):

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

其中, $f_B(s,a)$ 、 $f_D(s,a)$ 、 $f_J(s,a)$ 、 $f_P(s,a)$ 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

▼表1 语音业务用户A中的元素值和属性权重值

| 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

| 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中的元素值和属性权重值

| 视频业务 | 带宽 | 时延 | 抖动 | 丢包率 | 价格 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 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 |
| 丢包率 | 1/3 | 1 | 9 | 1 | 1/2 |
| 价格 | 1/2 | 2 | 8 | 2 | 1 |
| 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~

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

令 $\lambda \in (0,1)$ 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

续时间,从而使3种算法的期望回报差距也随之增大。

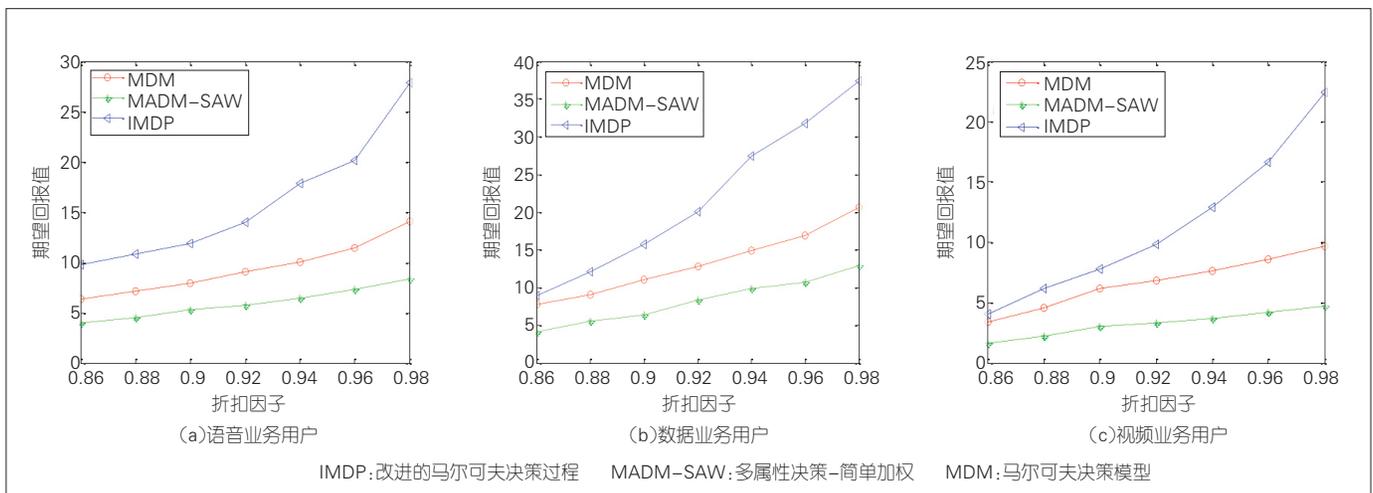
图3(a)、3(b)和3(c)分别为不同折扣因子值时的语音、数据和视频业务用户的网络切换次数。可以看出,随着折扣因子值 λ 的增大,3种算法的切换次数也在增加。这是因为较大的 λ 值对应较长的平均连接持续时间和较多的决策时刻点,从而增加了网络切换的可能性。与其他两种算法相比,本文提出的算法具有较少的切换次数。这是因为我们在算法中设置了预切换判决条件以避免“乒乓”,同时基于不同业务类型设计了触发判决条件,以满足不同类型用户的业务需求,有效地减少了不必要的切换。

5 结束语

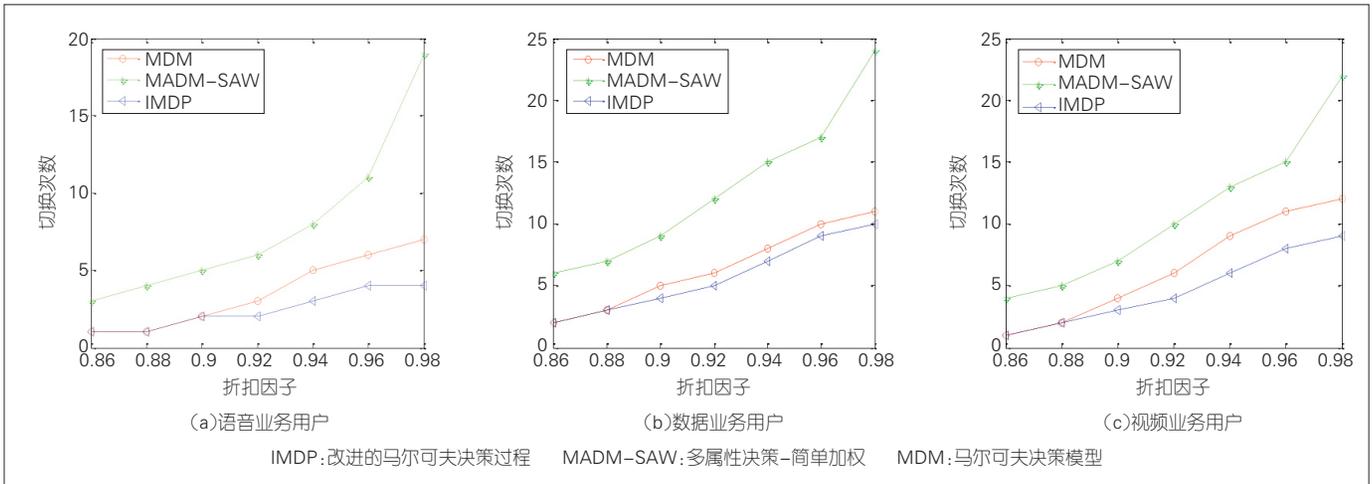
高铁是5G典型应用场景之一。基于5G技术完成列车运行控制与安全相关业务、乘客相关业务的高效、安全传输是铁路移动通信系统迫切需要解决的问题。高铁场景下公用无线接入网络(Wi-Fi、4G和5G)和铁路专用无线网络(GSM-R、LTE-R和5G-R)等多个异构网络在相当的长时间内会共存。5G-R新业务的出现

▼表4 候选网络属性参数

| 候选网络 | 带宽/(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) |



▲图2 不同业务类型用户的期望回报值



▲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

[1] Commission European. 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-lte-r-for-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 hand-off 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 heterogeneous wireless networks [C]//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

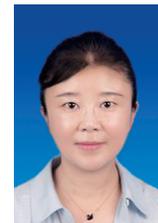
[18] SANGAIAH A K, GOPAL J, BASU A, et al. An integrated fuzzy DEMATEL, TOPSIS, and ELECTRE approach for evaluating knowledge transfer effectiveness with reference to GSD project outcome [J]. Neural computing and applications, 2017, 28(1): 111-123

[19] LIANG X, QIAN Z, TIAN H, et al. Heterogeneous wireless network switching selection

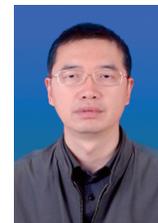
algorithm based on Markov decision model [J]. Acta physica sinica, 2016, 65(23): 206-214

[20] STEVENS-NAVARRO E, MARTINEZ-MORALES 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

作者简介



李翠然, 兰州交通大学教授; 主要研究领域为铁路无线通信、无线传感器网络和协同通信技术; 主持国家自然科学基金项目2项、省部级项目9项, 获科研成果奖4项; 发表论文60余篇, 获授权发明专利4项。



谢健骞, 兰州交通大学教授; 主要研究领域为铁路无线通信、认知无线电技术、铁路物联网; 主持国家自然科学基金项目1项、省部级项目8项, 获科研成果奖3项; 发表论文40余篇, 获授权发明专利3项。



高文娟, 兰州交通大学在读硕士研究生; 主要研究领域为异构无线网络技术。