

# 基于虚拟路测的轨道交通无线通信测试系统设计

张 超

(中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

**摘 要:** 针对铁路沿线网络环境复杂而路测成本高、周期长、故障不易复现等问题, 文章基于虚拟路测方法设计了一种轨道交通无线通信测试系统。该系统通过基站模拟器、信道仿真仪及虚拟路测软件等设备在实验室仿真模拟外场无线网络环境, 为车载无线通信终端设备提供可靠、可重复和可追溯的测试环境, 实现终端在运营商级、铁路专网、WLAN 网络中的性能指标和接入稳定性的测试评估。仿真结果表明, 该系统能够仿真模拟真实外场网络环境, 成功复现终端现场网络通信异常情况; 有效提升无线终端硬件性能, 并优化终端控制软件算法。

**关键词:** 轨道交通; 无线通信; 终端设备; 虚拟路测; 网络仿真

中图分类号: TN92; U2

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2021)06-0112-06

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2021.06.017

## Design of Wireless Communication Test System for Rail Transit Based on Virtual Drive Test

ZHANG Chao

(CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

**Abstract:** In view of the complex network environment along railway, there are some questions, such as high cost, long test cycle, poor flexibility, poor controllability, and product failure is not easy to reproduce. This paper designs a set of wireless communication test system that is suitable for rail transit industry and has function of virtual drive test. The system includes base station simulator, channel simulator and virtual road test software. Real field wireless network environments can be accurately simulated and played back in the laboratory, which provide reliable, repeatable and traceable test environment for vehicle wireless communication terminal equipment, and realize the performance index and test evaluation of access stability that the terminal used for the operator, railway private network and WLAN network. Simulation results show that the system can simulate and play back the real outfield network environments, effectively improve the hardware performance of wireless terminal and optimize the software algorithm of terminal control.

**Keywords:** rail transit; wireless communication; terminal unit; virtual drive test; network simulation

## 0 引言

随着无线通信技术的发展, 未来轨道交通将趋于

网络化、智能化和信息化, 机车车辆将主要基于自动驾驶和复杂驾驶辅助系统, 这就要求其必须具备高性能的移动车载终端设备以实现机车与外界稳定可靠的实时通信<sup>[1-2]</sup>。致使无线通信系统网络中断和不稳定的主要原因包括终端产品本身软硬件故障和外场网络环境因素。设计一套适用于轨道交通的无线通信测试系统, 为无线通信类产品的设计和优化提供测试

收稿日期: 2021-06-09

作者简介: 张超(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事轨道交通通信信号技术研究。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1201602)

条件,可提升该类产品抗干扰能力和通信质量,是目前轨道交通无线通信领域亟须解决的问题。虚拟路测(virtual drive test,VDT)<sup>[3]</sup>是通过获取和分析带有经纬度信息的海量测量数据、关联设备网络附着率并结合地理信息系统(geographic information system,GIS),获得与传统路测接近的数据。其通过获取轨道沿线无线覆盖信号强度、信号质量和事件信息来分析轨道交通无线网络问题,可给出针对性解决方案。

在该研究领域中,文献[4-6]进行了高速移动环境LTE(long term evolution)系统无线信道与性能联合测试方法研究,建立了无线信道特性参数与系统性能参数的精确对应关系。文献[7-9]提出了面向虚拟路测的无线信道仿真方法,搭建了虚拟路测系统,并通过对真实路测数据的处理获取无线信道特征参数,进而实现在实验室的外场测试验证。综合分析相关研究成果,目前针对轨道交通车载无线通信类产品的性能测试研究主要集中在3GPP国际标准或无线信道模型设计<sup>[10-12]</sup>,而这种实验室静态环境往往难以模拟和复现产品在轨道列车高速运行的复杂网络环境下的应用故障现象。

针对当前轨道交通行业无线通信测试研究的现状,本文基于虚拟路测方法设计一种轨道交通无线通信测试系统。该系统通过基站模拟器、信道仿真仪及虚拟路测软件等设备在实验室模拟外场无线网络环境,实现仿真模拟轨道列车无线通信产品“服务端-网络-车载终端”整个端至端的通信,既有效地提高了无线通信类产品设计的可靠性和鲁棒性,又能复现和排查产品运用现场故障,涉及产品问题、网络问题、信道问题和信号问题等,进而优化提升终端的硬件设计质量和软件算法性能。

## 1 轨道交通无线通信测试系统架构与功能

### 1.1 系统架构

轨道交通无线通信系统主要由车载子系统、无线通信传输网、数据处理及服务子系统、地面应用子系统等组成。本文设计的无线通信测试系统仿真模拟车载子系统(即移动终端)至地面应用子系统(地面服务端)的整条通信链路,主要由服务器、基站模拟器(无线通信综合测试仪)、信道仿真仪、网络扫频仪、网络路测软件、虚拟路测软件、屏蔽箱等软硬件组成,如图1所示。

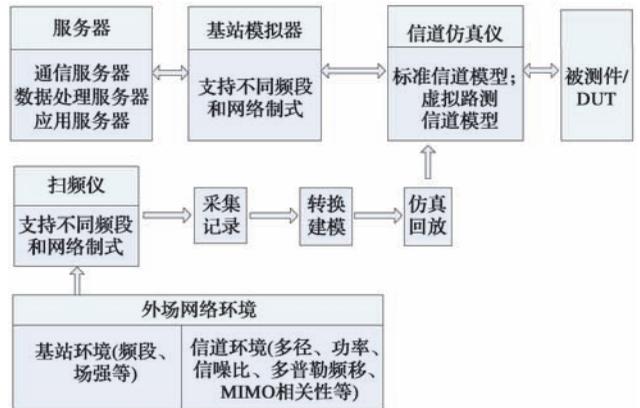


图1 轨道交通无线通信测试系统架构  
Fig. 1 Architecture of the wireless communication test system for rail transit

(1) 基站模拟器输出标准制式的射频信号,模拟无线通信中的基站,充当整个通信系统的接入网。

(2) 网络扫频仪即便携式外场移动测试设备,用于测试和采集外场无线数据并保存。

(3) 信道仿真仪用于回放外场收集的真实网络中信道参数。

(4) 网络路测软件用于显示和保存铁路外场测试的原始路测数据。

(5) 虚拟路测软件包含转换软件和回放软件,其中转换软件实现原始数据中信道参数的提取和转换,回放软件是将转换的信道参数放置信道仿真仪中进行回放。

(6) 服务器作为服务端等待与被测件DUT(这里为无线通信传输装置)进行连接,实现移动终端至服务端的网络通信,模拟仿真轨道交通无线通信类产品现场应用场景。

(7) 被测件DUT,即轨道交通无线通信车载终端,是TSC/CMD/WTD/安全通信插件等无线通信类产品。

### 1.2 系统功能

基于虚拟路测方法的轨道交通无线通信测试系统功能包括模块终端性能测试、网络覆盖测试和网络仿真测试3个主要功能,可以为新材料选型、新产品集成测试、软硬件变更等产品研发的各个阶段提供一致性和可靠性测试,实现产品无线通信功能的全覆盖测试。

#### 1.2.1 终端性能测试

轨道交通无线通信测试系统能够实现无线通信类终端产品的射频性能一致性和可靠性测试,以评估

终端的射频发射性能以及射频接收性能。射频发射性能包括功率、频率、占用带宽、频谱模板等；射频接收性能包括接收机灵敏度、丢包率等。其具体测试功能包括：

(1) 可按照 3GPP TS51.010-1 和 3GPP TS34.121 对 GSM/GPRS/CDMA/WCDMA 等无线通信产品开展射频一致性测试，除具备静态的测试能力以外，还需具备标准信道模型的测试功能。

(2) 可按照 3GPP TS 36 521-1 标准对 LTE 无线通信产品开展射频一致性 (Conformance) 测试，可加载 3GPP 定义的标准信道模型进行测试，工作频率包括轨道交通工程应用中要求的特定频段 (如 1 785~1 805 MHz 频段的 LTE-M 和 450~470 MHz 频段的 LTE-R)。

(3) 按照 IEEE Std 802.11<sup>TM</sup>-2012、GB 15629.1102-2003 和 GB 15629.1104-2006 对 WiFi 通信产品开展射频一致性测试，工作频率包括 2.4 GHz 和 5.8 GHz 两个频率。

### 1.2.2 网络覆盖测试

网络覆盖测试主要是用于网络的优化和提升，其目的是对投入运行的网络进行测试：通过数据采集并进行分析，找出影响网络质量的原因；通过技术手段或参数调整使网络资源获得最佳效益；同时了解网络的增长趋势，为后期扩容提供依据。其具体测试功能包括：

(1) 信号采集和测试，可采集存储外场无线信道衰落数据，包括多普勒频移、多径、时延、衰落及干扰等网络指标。

(2) 网络质量评估，支持 GSM/CDMA2000/WCDMA/LTE 等蜂窝通信网络和 WLAN 网络信号测量，检测项点包括但不限于物理小区 ID、基站小区 ID、RSRP、RSRQ、SINR 等网络指标。

(3) 评估铁路沿线、地铁隧道和机务段等网络应用环境是否满足《铁路信息化系统机务段应用暂行技术规范》要求，出具网络质量分析报告。

(4) 铁路专网基站部署 / 优化，用于指导铁路专网等基站部署方案性能测试，研究基站间距、基站高度及基站与铁轨间距离对网络性能的影响。

(5) WLAN 网络 AP 部署 / 优化，天线部署方案性能测试用于研究不同天线部署方案，如单向布置、双向布置以及天线波瓣宽度对网络性能的影响。

### 1.2.3 网络仿真测试

无线通信测试系统针对终端存在的频繁越区切

换、不同信号强度和不同网络制式间切换等应用场景进行网络仿真测试，可将真实的外场无线信道数据在实验室仿真回放，为无线通信终端提供可靠、可重复和可追溯的试验环境，考察运营高级、铁路专网及 WLAN 的终端数据性能、网络质量、接入稳定性等性能。其具体测试功能包括：

(1) 高速适应性测试，为高速移动场景 (速度 600 km/h 以上) 下的车载移动通信终端测试提供高速移动仿真环境。

(2) 终端灵敏度测试，提供特定噪声和多径环境下的弱覆盖场景，用于终端的接收灵敏度测试。

(3) 抗多径能力测试，仿真适用于高速移动场景的典型多径传播环境，支持自定义多径设置，用于终端的抗多径能力测试。

(4) 干扰性能测试，模拟同制式之间、不同制式之间、同制式不同信道之间网络干扰影响，模拟小区边缘的同频干扰。

## 2 轨道交通无线通信测试系统设计实现

无线通信常规测试模型包含：静态模型 (不添加任何干扰、衰落)、标准衰落模型 (国际标准自定义的衰落模型)。本文重点是研究基于虚拟路测的无线通信测试系统，通过路测自定义的衰落模型进行移动终端的网络性能测试。基站模拟器通过环形器与无线信道仿真仪进行连接，然后再通过环形器连接到被测件。从基站模拟器到被测件的下行数据流通过信道仿真仪添加衰落模型 (衰落因子包括功率、信噪比、多径、时延)，从被测件到基站模拟器的上行数据流通信链路未添加衰落模型。网络仿真测试主要由信号采集、数据处理和建模、网络仿真 3 部分组成，如图 2 所示。

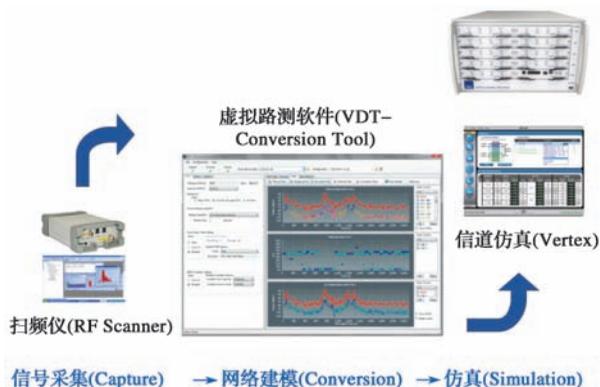


图2 轨道交通无线通信测试系统

Fig. 2 Wireless communication test system for rail transit

全套路测方案测试流程如图3所示。

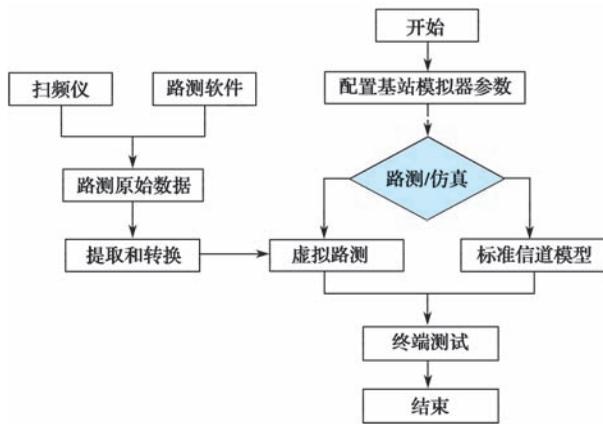


图3 轨道交通无线通信测试系统测试流程图

Fig. 3 Flow chart of the wireless communication test system for rail transit

(1) 信号采集。通过网络扫频仪采集无线网络的信道信息, 该信道信息包含制定频段信号的 PCI, RSRP, RS-CINR 和多径信息(时延、Doppler 频移、相对衰减)、频率响应等多种信息, 且包含基站信号的频段和场强等信息。

(2) 数据处理与建模。通过 Vertex 数据格式转换软件将提取的信道信息转化为与 DEE template 数据格式一致的包含信道信息的文件, 以 .xls 格式输出。定制化开发的虚拟路测软件具备自动生成信道模型, 能够自动匹配 3GPP 标准信道模型并自动修正信道衰落因子。

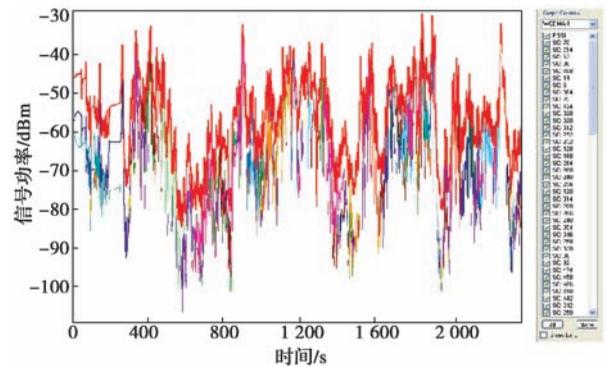
(3) 网络仿真。复制 .xls 文件中的信道信息至 DEE template 软件, 输出信道仿真器可以接受的 vstb 文件, 完成 DEE 信道文件的回放; 对比实测和回放信道信息, 在 Vertex 数据格式转换软件中微调系统参数, 以准确地复现现场测试信道特性。

### 3 系统验证与应用

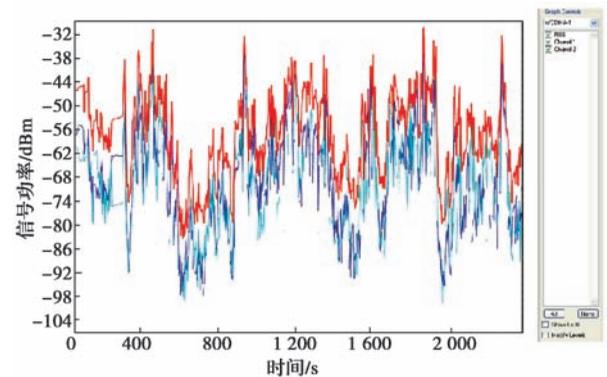
#### 3.1 测试验证

为了验证无线通信测试系统基于虚拟路测方法的网络仿真功能, 采用由扫频仪(TSMW)、虚拟路测软件(ROMES)、VDT-CT 转换工具、无线信道仿真仪(Vertex)及被测终端(EUT)组成的全套路测解决方案, 通过扫频仪和路测软件, 采集并分析外场的无线信道的数据, 包括慢衰落、功率谱时延分布、多普勒变化、多径时延等信息, 输出给无线信道仿真仪进行模型重构, 并通过综合测试仪(基站模拟器 CMW500)对外场路测无线信道数据进行回播。

参照系统测试流程, 首先通过扫描仪和路测软件采集测试区间基站小区的路测数据, 如图4所示, 该路测测试区间存在76个基站小区(图4(a)), 系统信道建模软件自适应选择最匹配的2个基站小区数据(图4(b)), 进而建立被测区间的信道模型。



(a) 外场原始数据



(b) 实验仿真数据

图4 测试区间基站小区的路测数据  
Fig. 4 Drive test data of base station cell in test area

通过无线通信综合测试仪仿真模拟车载子系统(即移动终端)至地面服务端的整条通信链路, 实现车载终端对仿真系统输出的信号接收功率(reference signal receiving power, RSRP)、接收的信号强度(received signal strength indication, RSSI)以及吞吐率(data throughput)等主要性能指标进行测试验证, 并与外场实测数据进行了对比。图5(a)和图5(b)中红色曲线为通过扫描仪外场实测的 RSRP 和 RSSI 结果, 蓝色曲线为该轨道交通无线通信测试系统的仿真模拟测试结果。从验证测试结果可以看出, 虚拟路测结果和外场实测结果可以在 RSRP 和 RSSI 主要参数上取得较一致的结果。如图5(c)所示, 吞吐率随着 RSRP 和 RSSI 的变化而变化, 并在小区切换的地方准确切换, 未断开, 这说明终端成功切换并继续承载通信业务。

仿真结果绝对值上存在略微差异, 带来该差异的

可能原因分析如下：(1)网络参数配置的差异，现场网络在实验室网络的基础上根据现场环境进行了参数配置的优化，该工作可能带来两套网络固有传输性能的差异；(2)网络结构上的差异，现场网络的一套核心网下面有76个基站小区，实验室只有两个，同时各网元（包括QoS测试服务器、EPC及eNB）之间的连接距离也有所差异，因此网络的拥塞情况有所不同；(3)位置统计区间上的差异，由于实测和模拟系统中吞吐量和无线覆盖参数并非在同一趟行程中测得，这将意味着吞吐量测试结果统计时在位置区间上存在微小差异，因此，无线信道的小尺度衰落和阴影衰落特征会有所不同。

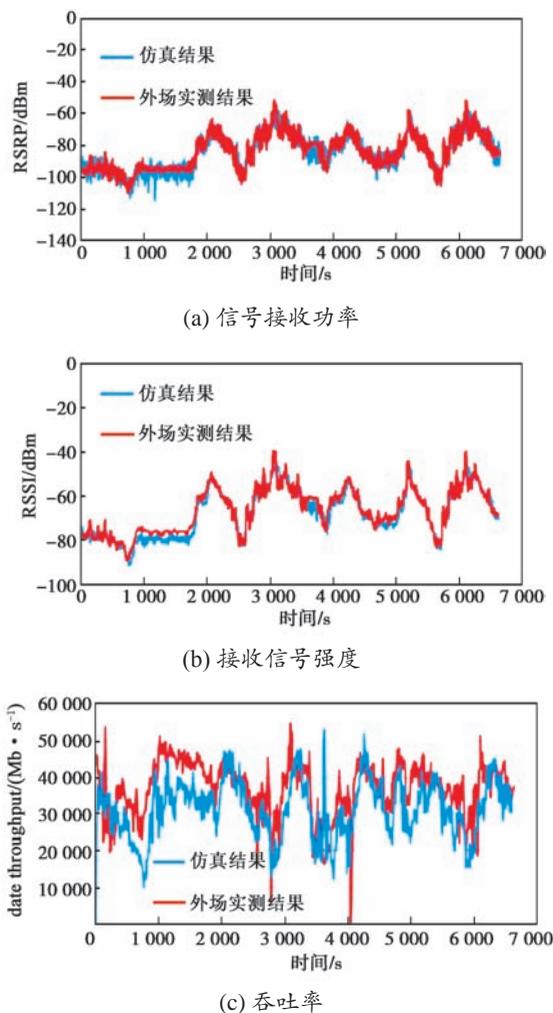


图5 无线通信测试系统实测和仿真结果

Fig. 5 Actual measurement and simulation results of the wireless communication test system

综上所述，该套无线通信测试系统能够将真实的外场无线网络环境精准地在实验室仿真回放。

### 3.2 系统应用

该轨道交通无线通信测试系统已广泛应用于干线铁路、城市轨道交通、中/高速磁浮等轨道交通领

域，成功解决了多起不同制式的无线通信类产品的现场通信异常和网络中断等故障，有效地解决了轨道交通领域内无线通信测试的行业难题，降低了产品的维护成本，提升了产品质量。此外，系统还满足无线通信类终端产品的射频性能一致性和可靠性测试、网络覆盖测试和虚拟路测等功能，支持5G、4G（TDD-LTE、FDD-LTE）、3G（CDMA2000、WCDMA）、2G（GSM）、WiFi（802.11a/b/n/g/ac）以及铁路专网（GSM-R、LTE-R、LTE-M）等无线通信制式的相关测试，可按照3GPP相关标准进行相关测试。该无线通信测试平台是一个端到端的产品质量测试/验证系统，功能覆盖了无线通信类产品的整个生命周期，其应用场景如图6所示。



图6 无线通信测试系统应用场景图

Fig. 6 Application scenarios of the wireless communication test system

## 4 结语

轨道交通无线通信测试系统能够真实地模拟轨道交通无线通信系统的应用网络环境，消除实验室测试和现场测试之间的界限，从而显著减少不必要的外场路测。在实验室真实地模拟外场（如铁路沿线、地铁隧道、机务段、车辆段等）网络应用环境，为轨道交通无线通信类产品提供一个更可靠、可重复且可追溯的测试环境。在这种测试环境下，网络问题的定位、追踪及解决都要比现场更加高效，网络错误和产品缺陷的修复更快。系统针对仿真与外场网络的差异，可以通过构建典型的信道仿真模型，从而在虚拟路测软件上执行更多的测试用例，为新物料选型、新产品集成测试、软硬件变更等产品研发的各个阶段，提供一致性和可靠性测试。

### 参考文献：

- [1] 李静. 轨道交通无线通信场景中的智能感知与接入[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- LI J. Intellisense and access in rail traffic wireless communication scenario[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.

- [2] 于健,姜正,陈广泰,等. 轨道交通车载无线通信终端设计与实现[J]. 铁路计算机应用, 2021, 30(4): 66-69.  
YU J, JIANG Z, CHEN G T, et al. On-board wireless communication terminal for rail transit[J]. Railway Computer Application, 2021, 30(4): 66-69.
- [3] 刘晓亮. 基于信道探测的虚拟路测技术研究与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.  
LIU X L. Research and implementation of virtual drive test technology based on channel sounding[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [4] 黄邦彦. 高速移动环境 LTE 系统无线信道与性能联合测试方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
HUANG B Y. Research on joint test of wireless channel and performance for LTE system in high-speed mobile environment[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [5] YANG M. The LabVIEW application in electronic information engineering professional basic teaching[C]//Proceedings of 2018 IEA 3rd International Conference on Frontier of Computer Science and Information Engineering(ICFCI 2018). 2018: 75-80.
- [6] SAMOUI S, EL BOUABIDI I, OBAIDATM S, et al. Improved IPSec tunnel establishment for 3GPP-WLAN interworking[J]. International Journal of Communication Systems, 2015, 28(6): 1180-1199.
- [7] 王涛. 面向虚拟路测的无线信道仿真方法研究与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
WANG T. Research and implementation of wireless channel emulation method for virtual drive test[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [8] HASHEM I A T, ANUAR N B, MARJANI M, et al. Multi-objective scheduling of MapReduce jobs in big data processing[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(1): 9979-9994.
- [9] CHEN J X, LIN G Q, CHEN J X, et al. Towards efficient allocation of graph convolutional networks on hybrid computation-in-memory architecture[J]. Science China Information Sciences, 2021, 64(6): 160409.
- [10] 赵金梦. 轨道交通场景 MIMO 信道特性分析与性能评估[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
ZHAO J M. Characteristic analysis and system performance evaluation of MIMO channel in rail traffic scenarios[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [11] ITU. IMT vision-framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond[DB/OL]. [2021-11-22]. [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-1!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-1!!PDF-E.pdf).
- [12] LI C R, LIU L, XIE J L. Finite-state Markov wireless channel modeling for railway tunnel environments[J]. China Communications, 2020, 17(2): 30-39.

## “矿山运输自动驾驶技术的研究与应用”专刊征稿启事

近几年,智慧矿山建设成为能源行业热点之一,从国家到地方,相关政策频频发布。矿山运输自动驾驶系统是智慧矿山的重要组成部分,其通过系统决策规划和车载传感器对环境感知,实现自动驾驶矿用设备采运作业,可提高生产安全性,提升社会效益。矿山运输自动驾驶系统属于多学科交叉融合的复杂技术系统,其与矿山运输传统作业在工艺流程上的深度结合是构建智慧矿山、加快数字化转型的重要一步。国家“新基建”政策以新的发展理念引领基础设施建设,5G通信、人工智能、区块链等相关新技术的不断涌现为各行业带来新的体验和新的机遇,进一步加快了自动驾驶技术在矿山运输领域的落地应用。

为更好地报道矿山运输自动驾驶技术研究现状及发展前景,《控制与信息技术》期刊拟在2022年下半年推出“矿山运输自动驾驶技术的研究与应用”专刊,内容涉及综述、自动驾驶技术、调度与车队管理技术、车联网通信、环境感知、决策规划、动力学控制、高精度地图绘制和作业场景描述等。现诚挚邀请相关技术领域的专家、学者及工程技术人员投稿(<http://ctet.csrzic.com>)。来稿请注明“矿山运输自动驾驶技术的研究与应用”专刊投稿,投稿截止日期为2022年6月1日。欢迎大家踊跃投稿!

《控制与信息技术》编辑部

