

# 5G 通信网络承载 CBTC 系统业务的方案研究及现场测试

陶 伟

(上海电气泰雷兹交通自动化系统有限公司, 202003, 上海//工程师)

**摘 要** CBTC(基于通信的列车控制)系统是目前城市轨道交通中广泛应用的信号系统,其中的车地无线系统负责承载列控信息。介绍了 5G(第五代移动通信技术)的发展趋势和性能特点,分析了 CBTC 系统的无线通信需求。在上海轨道交通 5 号线高架线路区段现场测试了不同场景下的 5G 承载 CBTC 系统业务的性能指标。测试结果表明:5G 带宽、端到端时延、漫游切换等方面的技术指标高于 CBTC 系统对数据通信系统无线子系统的技术要求,在技术性能上,5G 可以用于 CBTC 系统的业务承载;使用 5G 切片功能,在极端压力情况下,5G 通信网络可优先保证 CBTC 系统的业务传输,提高了 CBTC 系统业务传输的高可靠性。

**关键词** 城市轨道交通;基于通信的列车控制系统;第五代移动通信技术;业务承载

**中图分类号** U231.7

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2021.08.032

## Scheme Research and Field Test of 5G Communication Network Bearing CBTC System Service

TAO Wei

**Abstract** CBTC (communication based train control) system is a widely applied signaling system in urban rail transit, in which the train-wayside wireless system is responsible for carrying train control information. The development trend and performance characteristics of 5G technology are introduced. The wireless communication requirements of CBTC system are analyzed. The performance of 5G bearing CBTC system service under different scenarios is tested at the elevated section of Shanghai Rail Line 5. Field test results show that the technical indicators of 5G bandwidth, end-to-end delay, roaming and other aspects are higher than what CBTC system requires of wireless subsystem of data communication system, and in terms of technical performance, 5G can be used for the service bearing of CBTC system. Using 5G slicing function, 5G communication network can guarantee the service transmission of CBTC system in highest priority under extreme pressure, improving the high reliability of CBTC system service transmission.

proving the high reliability of CBTC system service transmission.

**Key words** urban rail transit; CBTC system; 5G technology; service bearing

**Author's address** Thales SEC Transportation System Co., Ltd., 202003, Shanghai, China

CBTC(基于通信的列车控制)系统是目前城市轨道交通中广泛应用的信号系统,该系统的基础是通过无线通信技术来承载车地的列车控制信息。在 CBTC 通信技术发展的道路上,先后经历了 2.4 GHz Wi-Fi 和 1.8 GHz LTE-M(城市轨道交通车地综合通信系统)两种车地无线通信制式,即轨旁控制设备通过 2.4 GHz Wi-Fi 或 1.8 GHz LTE-M 无线通信制式将 CBTC 系统控制命令发送给列车,列车同样通过 2.4 GHz Wi-Fi 或 1.8 GHz LTE-M 无线通信制式将自己的位置信息反馈给轨旁设备。但是,由于 2.4 GHz Wi-Fi 无线通信制式在带宽、时延以及抗干扰能力等方面存在一定性能瓶颈,随着无线通信技术的快速发展,2.4 GHz Wi-Fi 技术已经逐步退出了 CBTC 应用的舞台。自 2016 年开始,基于 1.8 GHz 专有频段的 LTE-M 无线通信制式逐步成为 CBTC 系统的车地无线传输的主流制式,并且广泛应用在各地的城市轨道交通项目中。

随着 2020 年 5G(第五代移动通信技术)在我国爆发式发展,加快推进以 5G 为代表的国家新基建战略,引领网络技术创新和网络基础设施建设,已成为支撑经济社会数字化、网络化、智能化转型的关键。目前 5G 已深度融入经济社会民生,造福于广大用户的日常生活。本文分析了上海轨道交通 5 号线 5G 通信网络承载 CBTC 系统的方案和现场测试情况。

## 1 5G 性能概述

目前 5G 已深度融入经济社会民生,5G 在通信

带宽、传输时延、海量物联、信息传递可靠性和安全性等多个方面具有较大突破。以5G作为广泛连接的信息“高速公路”,正在构建一个万物互联、智能运算的数字世界。“5G+行业场景应用”正在作为未来各行业业务演进的重要方向。

5G的主要优势在于:数据传输速率远远高于以前的蜂窝网络,可以为用户提供1 Gbit/s用户体验速率和10 Gbit/s峰值速率,比4G LTE(长期演进)网络快100倍;其次,5G可为用户提供低至1 ms的端到端时延,而4G的端到端时延为30~70 ms;5G还可以提供超大网络容量,提供千亿设备的连接能力,可以达到100万个/km<sup>2</sup>连接数密度。

## 2 CBTC系统无线通信的需求分析

在CBTC系统的发展过程中,DCS(数据通信系统)的发展尤为重要,而无线通信技术对CBTC系统中的车地之间无线高可靠传输起着至关重要的作用。不论是最早的基于2.4 GHz的Wi-Fi技术,或者是当前广泛采用的基于1.8 GHz的LTE-M技术,其根本目的都是为了提高车地无线通信系统的可靠性。在CBTC系统中,对DCS的性能指标需求为:①95%概率条件下车地通信单网络的越区切换时间应在100 ms以内信息传输的丢包率应小于1%;②车地通信经有线和无线网络传输延迟时间应小于150 ms;③车地通信每列车信息的传输速率不应低于1 Mbit/s。

通过以上的技术需求分析,5G理论上可以满足CBTC系统的承载需求,但是需要进一步通过现场测试进行验证。

## 3 上海轨道交通5号线5G承载CBTC系统现场测试

为了积极响应国家的5G发展战略,促进上海轨道交通数字化、智慧化水平的提高,以5G应用探索体系化、技术应用适用化、项目试点可快速复制推广为目标,2020年6月,上海电气泰雷兹交通自动化系统有限公司、上海申通地铁集团有限公司技术中心和电信上海分公司共同成立了《基于5G的轨道交通生产辅助业务综合应用研究与试点》项目课题组,共同探索5G在城市轨道交通CBTC系统的列车控制、视频监控、智能运维、列车定位等场景下的专业化应用。在该课题的第一阶段,将重点研究利用电信运营商的5G通道代替城

市轨道交通高架线路的2.4 GHz Wi-Fi和1.8 GHz LTE-M车地无线系统,用5G承载CBTC系统的列车控制信息。

课题组和行业专家经过多轮可行性论证,决定在上海轨道交通5号线上开展该课题第一阶段研究的现场应用测试。

### 3.1 DCS网络架构分析

上海轨道交通5号线DCS网络架构如图1所示。该网络包括轨旁骨干网、车地无线网络和车载网络。轨旁骨干网包含ATP(列车自动保护)骨干网、ATS(列车自动监控)骨干网。无线网络包括2.4 GHz Wi-Fi和1.8 GHz LTE-M两种无线通信制式的网络,双网络架构提高了CBTC系统在无线传输层面的可靠性。CBTC系统工作时,列车将会同时收到来自列车前方和后方的4条无线链路所传输的列车控制信息。车载无线网络由车载无线终端1.8 GHz TAU(车载终端无线接入)和2.4 GHz OBRU(车载无线单元)等设备组成。

### 3.2 现场测试

#### 3.2.1 测试计划

本次测试基于上海轨道交通5号线既有DCS网络,需对轨旁骨干网、车地无线网、车载网络分别做适当的改造以适配中国电信提供的5G网络。

本次测试的目的是:以中国电信的5G网络在上海轨道交通5号线高架段替代原2.4 GHz Wi-Fi和1.8 GHz LTE-M两种无线通信制式的网络,对5G承载CBTC系统的性能做出分析并验证该方案在城市轨道交通高架线路上使用的可行性。上海轨道交通5G网络架构如图2所示。

具体测试内容包括:验证5G网络的低时延、大带宽特性;验证基于5G传输通道下列车静态时5G通信的稳定性;验证基于5G传输通道下列车低速运行时5G通信的稳定性;验证基于5G传输通道下列车高速运行时5G通信的稳定性;验证基于5G传输通道下的列车ATO(列车自动运行)情况;验证5G切片功能对CBTC系统的业务带宽保障功能。

#### 3.2.2 测试选址

中国电信在2020年对上海轨道交通5号线高架沿线进行了5G基站建设,因此本次测试将在上海轨道交通5号线剑川路站至颛桥站高架区段进行。使用5G XAU(5G车载接入终端)设备对上海轨道交通5号线高架线路进行无线性能预勘测。剑川路站至颛桥站(高架)5G覆盖信号强度以及信噪

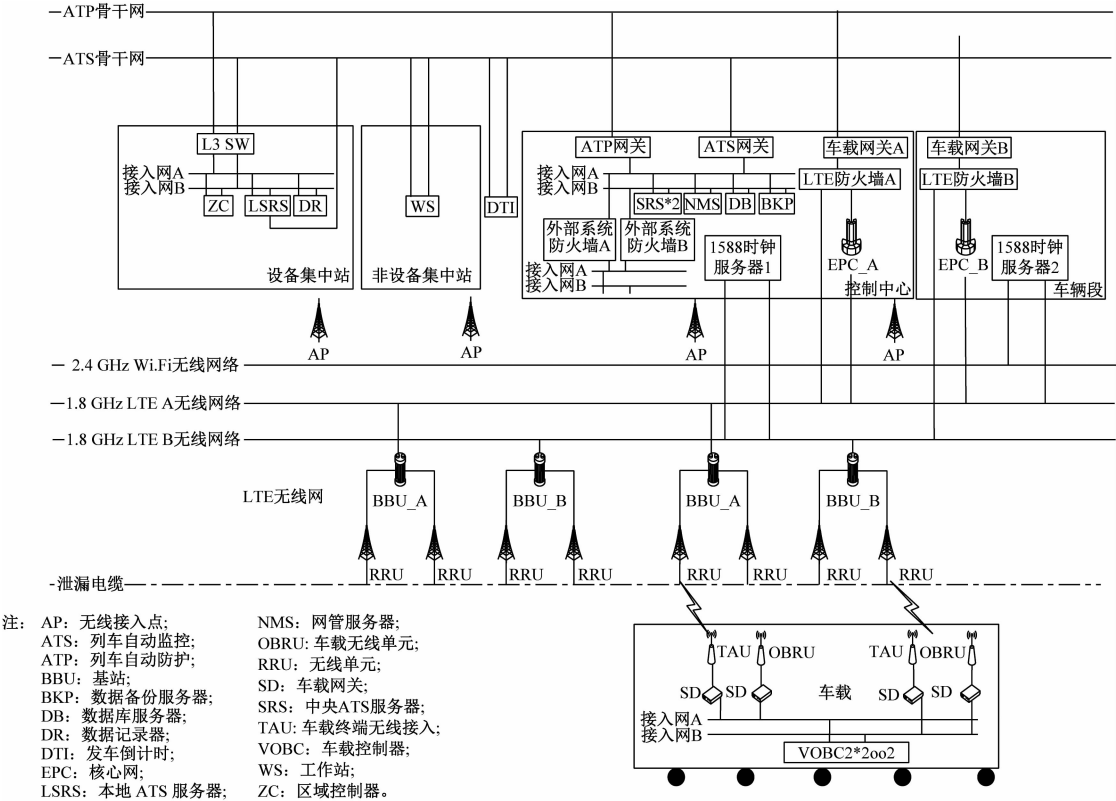


图1 上海轨道交通5号线DCS网络架构

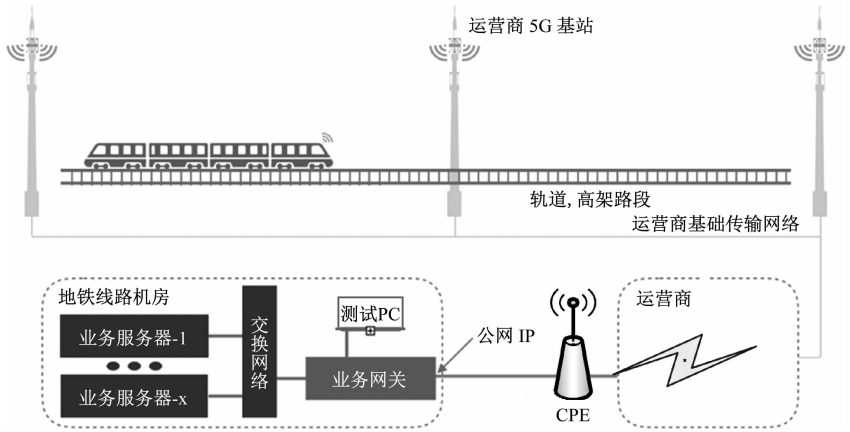


图2 上海轨道交通5号线5G网络架构图

比测量结果为:5G 的 RSRP(参考信号接收功率)大于等于 -110 dBm 的覆盖率达到 97.5%,满足浅层覆盖需求;SINR(信号与干扰加噪声比)大于等于 0 的占比达到 97.18%,信号质量良好。图 3 为上海轨道交通 5 号线高架区段 5G 信号强度图。

3.2.3 测试网络改造

为了完成本次测试,需要对上海轨道交通 5 号线既有 DCS 网络进行改造,以适配中国电信的 5G 网络。轨旁改造的项目为:在控制中心新增防火墙

及光电转换设备,定制安全策略,对控制中心的安全加密设备进行配置文件升级;在莘庄停车场、莘庄站敷设备用光缆、光电转换器、5G CPE 等设备连通莘庄站至控制中心的 5G 传输通道。测试期间,中国电信的 5G 铁塔信号将会和莘庄停车场的 CPE 通信实现 5G 信号的落地,并最终通过新增的 5G 专属的传输通道回传至控制中心。

在测试车辆上,改造工作包括:安装 5G 定制化 XAU,安装5G定制天线、车载防火墙等设备,用于

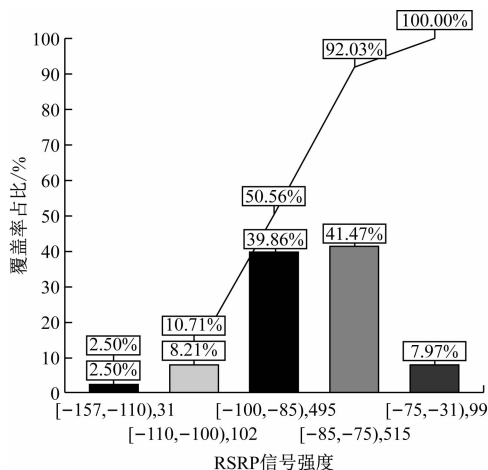


图3 上海轨道交通5号线高架区段5G信号强度图

确保测试列车在测试区间和轨旁的中国电信5G铁塔信号进行关联并最终和控制中心进行双向的无线通信。图4为上海轨道交通5号线轨旁DCS网络改造示意图。图5为上海轨道交通5号线DCS车载网络改造示意图。

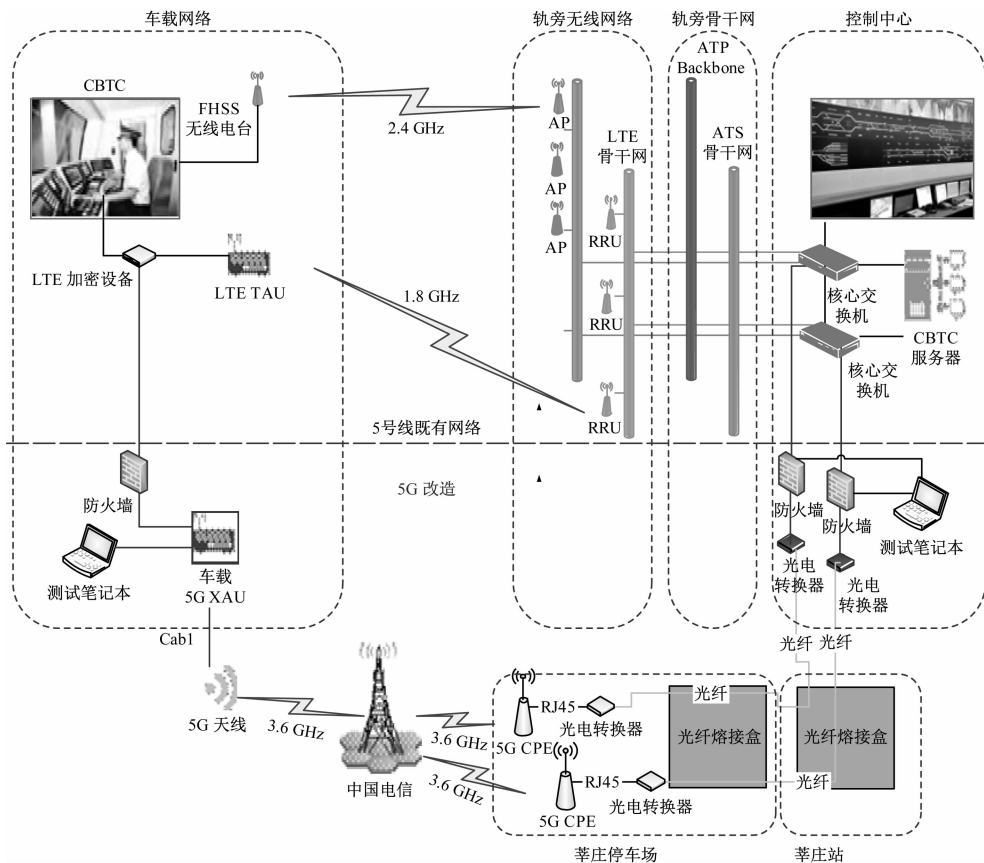
### 3.3 现场测试结果

在对轨旁DCS网络和DCS车载网络完成改造

后,利用夜间停运后的动车点,进行5G承载CBTC系统测试。测试前,对既有的2.4 GHz Wi-Fi网络和1.8 GHz LTE网络进行下线操作,关闭所对应的2.4 GHz和1.8 GHz网络通信设备。然后开启车载5G XAU及轨旁相关5G设备,使车载5G XAU、轨旁CPE中的5G SIM卡在中国电信5G网络中顺利注册并上网,最终建立列车和轨旁中国电信5G铁塔的传输通道。

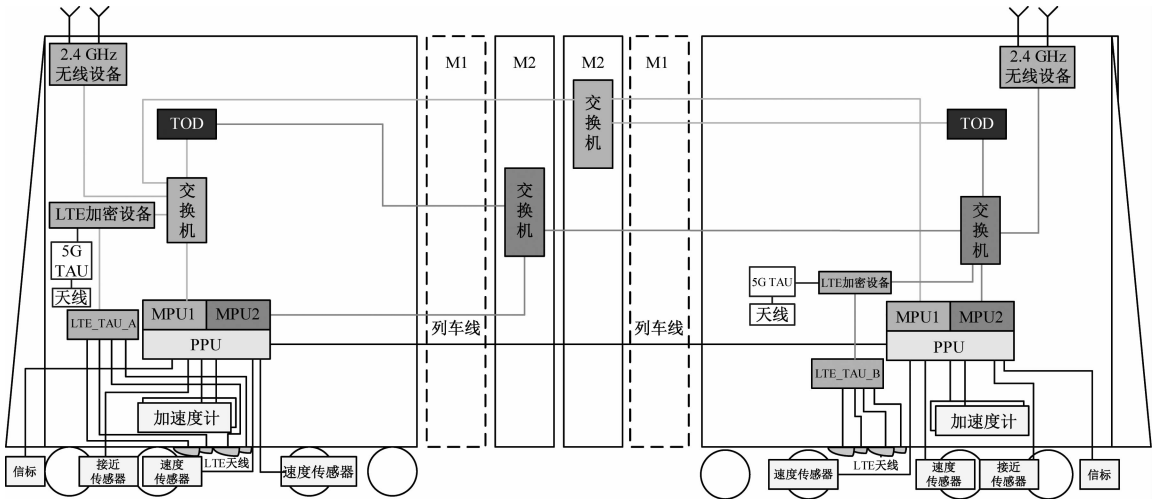
1) 使用XAU进行列车的无线漫游测试,测试列车在测试区段运行过程中的5G小区切换、实时下载速率和实时上传速率。测试结果(见图6和图7)表明:PDCP(分组数据汇聚协议)下行速率大于等于100 Mbit/s的占比达到96.93%,下行体验速率良好;PDCP上行速率大于等于50 Mbit/s的占比达到92.55%,上行体验速率良好。

测试结果显示,使用5G作为车地无线通信传输,在传输速率上远远大于CBTC系统对于数据通信系统无线性能“车地通信每列车信息的传输速率不应低于1 Mbit/s”的技术要求。



注: FHSS——跳频扩频通信。

图4 上海轨道交通5号线轨旁DCS网络改造示意图



注:TOD——列车司机显示单元; MPU——主处理单元; PPU——外围处理单元。

图5 上海轨道交通5号线DCS车载网络改造示意图

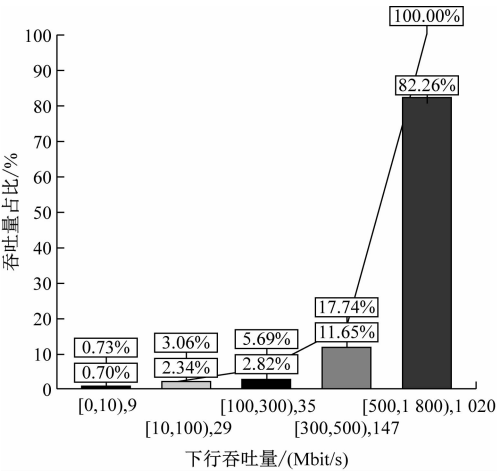


图6 测试车辆的实时下载速率图

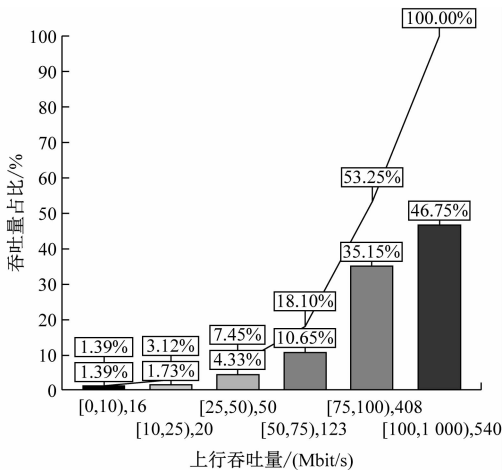


图7 测试车辆的实时上传速率图

2) 使用 IxChariot 软件进行端到端时延测试, 计算车载设备发出的数据包通过中国电信 5G 网络最终到达轨旁控制中心的通信链路时延。测试结

果(见图8)为:CBTC 系统业务端到端时延为 16 ms (含越区切换时间), 远高于 CBTC 系统对 DCS “95% 概率条件下车地通信单网络的越区切换时间应在 100 ms 以内”以及“车地通信经有线和无线网络传输延迟时间应小于 150 ms”的技术要求。采用同样的方法, 共计进行了 10 个来回的测试, 平均的端到端时延(含越区切换时间)为 17 ms。

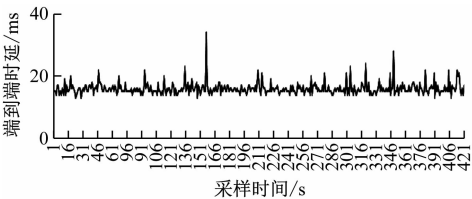


图8 车载设备到轨旁控制中心的端到端时延测试结果

3) 进行车地无线通信传输的丢包率测试。当列车运行时, 针对列车 A 端, 从 NMS(网络管理系统)到 5G XAU 进行 ping 包, 每秒 250 字节报文。第一次测试结果显示: 已发送 18 353 个, 已接收 18 221 个, 丢失 132 个, 丢包率为 0.07%。测试结果远好于“信息传输的丢包率应小于 1%”的性能要求。采用同样的方法, 共计进行 10 次测试, 平均丢包率为 0.071%。

4) 验证列车运行时 5G 切片功能对 CBTC 系统的业务带宽保障功能。中国电信通过 5G 核心网对 CBTC 系统业务流进行切片配置, 将 CBTC 系统的 QOS(服务质量)优先级设为最高, 以确保在极端压力情况下, 5G 带宽将会优先保证 CBTC 系统的使用, 以避免对运营的影响。在本次测试中, 将 CBTC 保障带宽设为 30 Mbit/s。

使用 IxChariot 软件进行测试。测试结果(见图9)为:在仅有普通 5G 用户共享 5G 基站所提供的带宽时,CBTC 系统的业务上行速率稳定在 80 Mbit/s 左右;当中国电信通过多 5G 终端抢占 5G 基站所使用的带宽时,极端压力情况下,CBTC 系统的业务上行速率下降到最低 30 Mbit/s,与 GBR(保证比特速率)业务配置的 30 Mbit/s 保证速率一致。测试结果表明,启用 5G 切片功能并为 CBTC 系统业务设置了保证带宽后,当发生众多 5G 终端抢占 5G 带宽的极端情况时,中国电信的 5G 基站仍然可以为 CBTC 系统业务保障提供 30 Mbit/s 的带宽,以确保极端压力情况下的列车正常运营。

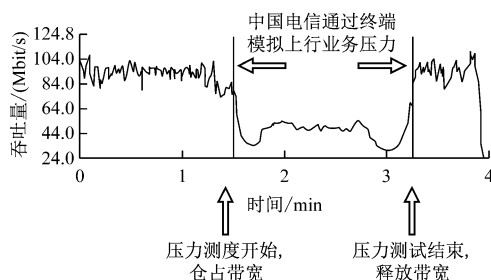


图9 5G切片功能对CBTC系统的业务带宽保障功能测试结果

5) 验证列车基于 5G 通道的 ATO 模式下的运行情况。测试结果(见图 10)为:当列车使用 5G 网络建立车地通信后,ATS 界面显示列车以 65 km/h

(上接第 149 页)

TWC 检测系统嵌入了 GPRS 模块,亦可通过 GPRS 传输方式将 TWC 检测数据传送至后台监测系统<sup>[12-13]</sup>,从而实现联网监测以及告警、预警,并发出相应的声、光报警等信号,便于管理人员对站点的设施进行调整。此外,TWC 检测系统能保存并备份 TWC 系统通信质量数据,以便相关人员进行查询和追溯。

## 参考文献

- [1] 余辉. 上海地铁 2 号线车地通信系统分析[J]. 铁道通信信号,2004(4): 30.
- [2] 梁鉴如,张莉萍,马子彦,等. 上海轨道交通 2 号线车地通信信号的检测[J]. 城市轨道交通研究,2013(8):97.
- [3] 周庭梁,周雄军,张立鹏. 城市轨道交通车载信号设备状态的自适应采集研究[J]. 城市轨道交通研究,2010(11):43.
- [4] 王烟青,袁仕继,张英杰,等. 2FSK 信号非相干检测法解调抗干扰性能仿真分析[J]. 舰船电子工程,2012(7):85.

的速度在 ATO 模式下正常运行。

## 4 结语

基于中国电信 5G 通信网络的 CBTC 系统传输现场测试,自 2020 年 11 月开始至 2021 年 1 月结束,共持续 2 个多月。在上海轨道交通 5 号线高架线路区段进行了 4 种不同场景的测试,测试结果表明:在城市轨道交通高架区段,使用 5G 来替代 2.4 GHz Wi-Fi 以及 1.8 GHz LTE-M 网络,5G 带宽、端到端时延、漫游切换等方面的技术指标高于 CBTC 系统对数据通信系统无线子系统的技术要求,在技术性能上,5G 可以用于 CBTC 系统的业务承载。而使用 5G 切片功能,可以确保在极端压力下优先保证 CBTC 业务的传输,进一步提高了 CBTC 系统业务传输的高可靠性。

下一阶段,将会对隧道场景下 5G 承载 CBTC 业务以及基于 5G 的网络安全等场景做更为深入的研究、分析和测试;将结合第一阶段的测试结果,最终确认 5G 承载 CBTC 业务的方案架构。

## 参考文献

- [1] 上海申通地铁集团有限公司技术中心. 5G 技术应用深化研究与示范任务书[R]. 上海:上海申通地铁集团有限公司技术中心,2020.
- [5] 井敏英. 2FSK 通信系统信道仿真分析[J]. 实验室研究与探索,2013(11):82.
- [6] 吴志敏,黄红兵,肖大光. 基于 DFT 的 FSK 数字化解调算法研究[J]. 通信技术,2008(4):36.
- [7] 张慧颖,田东生. 基于蓝牙技术的实验室环境监测系统设计[J]. 实验室研究与探索,2018(8):290.
- [8] 李飒,李如强,黄凯. 车载 FSK 信号载频和调制频率的实时检测方法[J]. 机械与电子,2009(7):59.
- [9] 郝雯,沈金鑫,梅成. 基于 STM32 单片机的存储式数据采集系统设计[J]. 电子设计工程,2013(17):80.
- [10] 霍涛,贾振堂. 基于 STM32 和 SIM900A 的无线通信模块设计与实现[J]. 电子设计工程,2014(17):106.
- [11] 闫文婷. 基于蓝牙技术的数据传输的研究与实现[D]. 南京:南京理工大学,2004.
- [12] 李志. 基于无线通信网络的车地数据传输策略优化与实现[D]. 北京:北京交通大学,2015.
- [13] 李春. 城市轨道交通基于通信的列车控制系统车地无线通信优化方案[J]. 城市轨道交通研究,2011(9):103.

(收稿日期:2019-07-12)