

# 上海城市轨道交通信号系统车地通信演进研究<sup>\*</sup>

朱 俊<sup>1</sup> 陶小婧<sup>2</sup> 张 郁<sup>2</sup> 曾贵华<sup>3</sup>

(1. 上海申通地铁集团有限公司, 201103, 上海; 2. 上海地铁维护保障有限公司通号分公司, 200235, 上海;

3. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 200240, 上海//第一作者, 工程师)

**摘 要** 在介绍信号系统车地通信概念的基础上,阐述了上海城市轨道交通车地通信系统的现状,分析了既有车地通信系统中无线保真技术、长期演进技术面临的问题以及信号设备维护上的问题。提出建立长期演进的双制式车地通信系统的方案。针对上海城市轨道交通线网运营管理和新线建设的实际情况,从既有更新改造及新线建设两方面提出具体的双制式技术方案,以保证城市轨道交通信号系统运行的稳定、安全、高效。

**关键词** 城市轨道交通; 信号; 车地通信系统; 无线保真; 长期演进; 无线干扰

**中图分类号** U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.11.011

## Train-Wayside Communication Evolution of Shanghai Urban Rail Transit Signaling System

ZHU Jun, TAO Xiaojing, ZHANG Yu, ZENG Guihua

**Abstract** After introducing the concept of signaling system train-wayside communication, the current situation of Shanghai rail transit train-wayside communication system is expounded, and the problems of Wi-Fi technology, long-term evolution technology and signaling equipment maintenance in the existing train-wayside communication system are analyzed. A scheme of establishing long-term evolution dual mode train-wayside communication system is put forward. According to the actual situation of Shanghai rail transit network operation management and new line construction, specific dual mode technical scheme is proposed from two aspects of existing line transformation and new line construction, so as to ensure the stable, safe and efficient operation of urban rail transit signaling system.

**Key words** urban rail transit; signal; train-wayside communication system; wireless fidelity; LTE; wireless interference

**First-author's address** Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China

## 1 车地通信系统概述

CBTC(基于通信的列车控制)已经成为目前城市轨道交通信号系统的主流方式。CBTC系统中的列车控制主要通过车地无线通信设备与轨旁系统设备进行信息的交换和传递来实现信号数据的传输,而管理这个信息传递过程的系统就是信号的车地通信系统。车地通信系统对于CBTC系统极其重要,城市轨道交通线路沿线包括车站、车辆段、运营控制中心等区域都被其覆盖到。

CBTC系统对通信技术的可靠性及无线信息的传输效率要求非常高,要求MTBF(平均故障间隔时间)大于 $2 \times 10^5$  h,可用性指标大于99.999%。虽然DCS(数据通信系统)在设计阶段一般均采用了双套冗余结构,可有效防止网络发生单点故障,但是一旦发生通信故障或传输效率降低等情况,可能会导致中央控制信息的中断,直接影响整个CBTC系统的运行,属于城市轨道交通运营的致命风险点,也是故障的零容忍环节。

由于车地通信系统网络采用的是无线传输模式,在实际运营中难以避免存在无线通信信号的衰减、丢失和受干扰等情况,由此可能会导致1辆或多辆列车发生EB(紧急制动),或因区域网络失效导致运营模式降级等情况的发生,最终导致列车运行晚点、运输效率下降。发生严重的车地无线通信故障时,不仅仅会影响城市轨道交通系统的正常运营,甚至可能威胁到乘客的人身财产安全。本文提出建立双制式车地通信系统的方案,以保证城市轨道交通信号系统能稳定、安全、高效地运行。

## 2 车地通信系统的使用现状

车地通信系统网络主要是通过设置在轨道旁

<sup>\*</sup> 上海申通地铁集团有限公司博士后科研工作站项目(LS21R063)

的大量无线接入点与车辆上的车载无线单元设备进行数据交互。无线通信的故障主要集中为信号数据的丢包问题、延时瓶颈问题及信号干扰问题。

现阶段上海城市轨道交通的无线通信网络采用共用的 2.4 GHz 及 1.8 GHz 频段。2.4 GHz 频段属于非授权频段,由于终端智能技术的发展及同频无线产品的大量使用,压缩了 CBTC 车地通信系统的使用空间,对 CBTC 系统的正常运行造成了很大的影响。为了确保 CBTC 系统的可持续发展,上海城市轨道交通在近阶段信号系统大修改造的 5 号线、新建的 15 号线和 18 号线、在建的 14 号线均采用了 1.8 GHz 通信 LTE (长期演进)系统,用以承载 CBTC 的无线通信业务。正在改造的上海轨道交通 2 号线,其新增 CBTC 系统的无线通信也采用了 1.8 GHz 的 LTE 系统。现有车地通信系统无线制式的具体使用情况如表 1 所示。

表 1 上海城市轨道交通车地通信无线制式的使用现状  
Tab.1 Application status of train-wayside communication wireless system in Shanghai Urban Rail Transit

无线制式	频段/GHz	使用情况
802.11 跳频扩频	2.4	用于 6 号线、7 号线、8 号线、9 号线、11 号线的列车控制。以 1 MHz 为单位,在 80 MHz 带宽范围内随机使用
802.11 g 直接序列扩频	2.4	用于 10 号线、12 号线、13 号线、16 号线、17 号线的列车控制。固定使用 5 MHz 带宽
LTE	1.8	用于 5 号线的列车控制。仅使用城市轨道交通专有 5 MHz 带宽
LTE	1.8	用于大修改造中的 2 号线的列车控制与无线集群调度。使用 20 MHz 带宽
LTE	1.8	用于 15 号线、18 号线及 14 号线(在建)的列车控制与其他业务综合承载。使用 20 MHz 带宽

### 3 车地通信系统现有问题分析

#### 3.1 信号无线通信问题分析

##### 3.1.1 Wi-Fi(无线保真)的现有问题

上海城市轨道交通线网的 CBTC 系统中,除了 2 号线、5 号线、14 号线、15 号线、18 号线外,其他线路的车地通信系统都是基于 2.4 GHz 频段,并通过轨旁无线单元均匀分布在正线、车辆段、试车线中。随着无线技术的发展及普及,各种同频用户激增,城市轨道交通的外部干扰源日益复杂,各类安全隐患也逐渐显现。城市轨道交通使用 Wi-Fi 技术承载

车地通信的无线业务,缺乏有效的抗干扰机制,容易受到外界的干扰,导致使用安全性降低。

此外,上海轨道交通线路 6 号线、7 号线、8 号线、9 号线、11 号线采用的第一代 CBTC 系统都基本达到了使用年限,部分电子器件的老化也导致无线通信的性能退化,且存在无线覆盖能力降低、车载通信故障频发等问题,对这些线路的日常运营尤其对早晚高峰的运营产生了一定的影响。因此,这些线路车地通信的可靠性和可用性亟需提高。

##### 3.1.2 LTE 技术可能面临的问题

与 Wi-Fi 技术相比,LTE 技术有了非常大的改进,特别是具有专用频段、不易受干扰等优点,在一定程度上缓解了外界对城市轨道交通信号无线通信的干扰。但是,移动场景下的无线通信干扰仍难以避免。LTE 无线通信面临的干扰大致可分为系统内干扰和系统外干扰 2 部分,其中:系统内干扰主要来自于同频邻区干扰,LTE 系统一般会通过功控算法、IRC(干扰抑制合并)等技术来控制 and 消除外来干扰,因此在系统设计完善的情况下,此类干扰的影响不大;系统外干扰一般指来自于 LTE 系统外部的干扰。对于 LTE 来说,1.8 GHz 频段的制约主要来自上海无线电管理委员会对无线资源上的分配。国家工业和信息化部[2015]65 号《工业和信息化部关于重新发布 1785-1805 MHz 频段无线接入系统频率使用事宜的通知》中明确,1.8 GHz 频段不仅可用于轨道交通,还可用于民航、电力、石油等行业,轨道交通使用 1.8 GHz 频段中只有 5 MHz 为轨道交通地面、高架线路区间专用,其余 15 MHz 为行业共用频段,由此可能会发生因附近如民航、电力、石油等其他行业系统较强同频无线信号的干扰而引起城市轨道交通无线接收设备接收灵敏度降低的情况,最终导致无法解调信号,发生车地通信中断。

另外,因为受限于 LTE 频宽资源,LTE 网络传输业务带宽通常比较小,无法将车辆 CBTC 系统日志、车辆状态统计分析等数据实时上传到地面服务器。目前除了 12 号线、13 号线、16 号线使用 Wi-Fi 无线定时上传外,其他线路仍采用人工进行数据复制的方式。由于列车夜间集中停放在车辆基地,且随着城市轨道交通智能运维技术的发展,使得车载日志数据、分析数据及车载视频监控数据大量增加,导致 LTE 单网无法承载大量的数据并发。

### 3.2 信号无线干扰的典型案例分析

本文给出 1 个车地通信受干扰的典型案例分析,用以说明无线干扰对运营的影响。2020 年 7 月 1 日,因受干扰信号影响,上海轨道交通 9 号线洞泾站—佘山站上下行区段突发车地通信故障,列车降级限速至 20 km/h 通过该区段,多列车出现迫停现象。维护单位采用了重启信号环网中无线 AP(接入点)板、重启环网交换机、插拔网线等方式,均无法解除该故障。对洞泾站的站台、站厅、地面等多处进行无线干扰测试后发现存在类似高斯白噪声干扰,该干扰严重影响了 2.4 GHz 无线频段的通信质量。后通过轨旁环网抓包分析和洞泾站的无线干扰测试,最终确定这次影响列车通信的故障根源为外部宽带强干扰,致使洞泾站—佘山站上下行区段的列车通讯中断,使列车在该区段无法正常运行。该故障发生期间,9 号线的徐家汇站、漕河泾开发区站先后启动了三级客流应对措施,故障共计造成 5 min 晚点 13 列次、清客 15 列次。

### 3.3 设备维护中面临的问题

无线通信技术正处于快速革新阶段,从 4G(第 4 代移动通信技术)的全面覆盖、5G(第 5 代移动通信技术)的逐渐应用到 6G(第 6 代移动通信技术)的初步研究,历时不满 10 年,而且新一代制式的更新迭代周期明显短于上一代的换代周期。但对于轨道交通行业而言,往往在线路开通运营后 15 年甚至更长的时间才进入信号系统的大修改造阶段。这 15 年的运营期内,可能会发生因建设时所使用的无线通信技术被淘汰而导致前代甚至是前前代无线通信设备停产停修、备品备件缺失的情况,进而导致无法满足设备的后续维护需求、因无备件更换而无法快速解决故障等问题。

此外,由于上海城市轨道交通线网中不同线路所处的规划与建设阶段有所不同,10 余条线路存在很多的通信制式问题,也不利于后续通信系统的扩展及线路间的互联互通。

## 4 车地通信系统的建议方案

针对上文提到的几个问题,本文提出建立 LTE-M 和 Wi-Fi 双制式车地通信系统的方案,即:针对车地通信建立 2 种无线制式的通信系统,以确保信号车地通信系统在至少有 1 个成熟稳定的技术使用情况下,还有 1 个全新的技术模式作为冗余。双

制式的设计确保了单个无线系统在受到干扰发生故障时不会影响到另 1 个制式的无线系统。无论哪个制式的通信设备发生故障,理论上都不会导致通信的中断或延时,因而不会影响整个信号系统的正常运行。而且,通过采用新技术,也解决了无线通信技术发展快引起的相关问题,保证在信号大修前该线在建设时所采用新的技术设备还未被淘汰,也不会面临备品备件缺失的问题。大修改造时,先对较旧制式的车地通信系统设备进行更新改造,以减少大修改造期间的运营管理风险。

基于上海城市轨道交通的既有有线网和新建线路的实际,本文将信号车地通信系统的双制式方案分为更新改造及新线建设 2 部分进行具体分析。

### 4.1 既有线路的更新改造方案

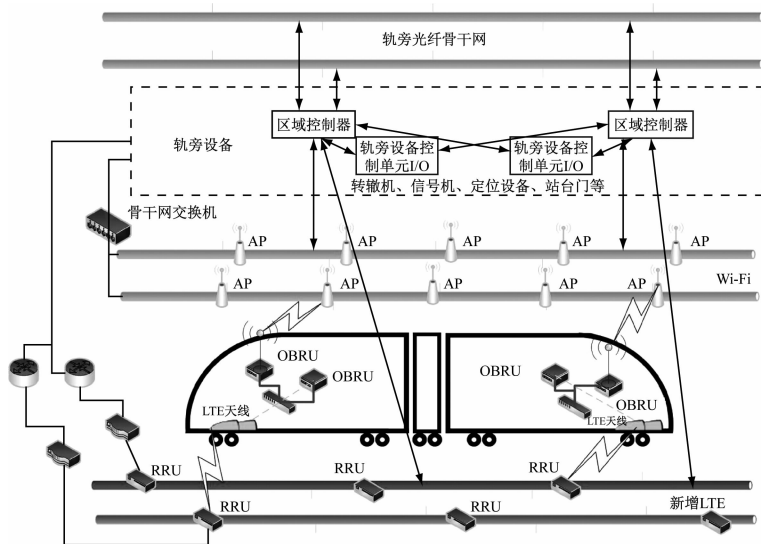
针对上海现有的城市轨道交通信号系统,其更新改造应着重提升系统的可靠性及可实施性,并适应技术的发展,满足后续长期高效运营的需求。车地通信系统的更新改造首先需要通过更换无线覆盖的设备,消除同频、临频干扰导致车地通信质量不稳定的问题。

对于采用 Wi-Fi 系统进行车地通信的线路,车地通信系统可以在保留原 Wi-Fi 系统架构的基础上,更换信号无线覆盖设备,并增加 1 套 LTE 车地通信网络。通过冗余配置,形成 Wi-Fi 系统和 LTE-M 系统共同组网的状态。由此不仅可在大修改造期间保证设备不间断运营及数据正常通信,还通过双频段组网实现了冗余,即使 1 个频段的所有信道和带宽都被干扰信号堵塞,另 1 个频段仍然能够维持正常的车地通信,从而降低车地通信通道的故障率,基本杜绝受同频、临频干扰导致通信质量不稳定的情况,在整体上提升了车地通信系统的可靠和可用性,最终实现信号系统对运营的零干扰。

车地通信系统在保留既有 CBTC 骨干网设备的同时,增加支持 LTE-M 车地通信的骨干网设备,并增设有线骨干网设备,确保线网的双制式冗余状态。如图 1 所示,双制式信号车地通信系统的设备包括适用于 Wi-Fi 与 LTE-M 的 2 套轨旁无线设备与车载,即 RRU(射频拉远单元)、AP、OBRU(车载无线单元)。通过轨旁光纤骨干网链接车站、停车场/定修段、运营控制中心的网络和骨干网交换机。新的网络将整体采用多重冗余网架构,确保 CBTC 系统所有轨旁设备都与信号车地通信系统相连。新增无线环境监测设备,搭建 LTE-M 和 Wi-Fi 的双

无线架构,使每列车均有 4 条无线链路和轨旁进行

数据交互,最终形成冗余的车地通信网络架构。



注:I/O——输入/输出。

图 1 双制式信号车地通信系统的设备架构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of equipment architecture of train-wayside communication system with dual mode signal

## 4.2 新建线路的建设方案

对于新建线路的车地通信系统,建议采用最新的通过验证的系统和硬件,以全方位地提升系统的可靠性、可用性和可维护性。在目前的技术条件下,车地通信系统宜采用 LTE-M 和 Wi-Fi 双冗余架构综合承载线路信号及通信专业系统的多个业务,如 CBTC 系统、PIS(乘客信息系统)、车载视频监控等,以进一步控制工程建设成本。通过采用 2 套不同的通信制式,使之成为双无线系统,各自独立工作,从而达到 2 种制式之间的完全隔离且互为冗余。

随着通信技术演进,5G 已在运营商网络中大规模部署。与 4G 网络相比,5G 网络的传输带宽更大,传输时延更小,在海量物联、信息传递可靠性、安全性等性能也有较大突破。5G 的逐渐成熟,也使其在城市轨道交通中的应用范围有所拓宽,使用场景逐渐增加。近期上海城市轨道交通已考虑通过使用运营商的 5G 网络来进行传输 CBTC 车载系统日志、统计分析数据实时上传到地面服务器的试验,后续将从基于 5G 的移动视频监控及定位等方面入手,验证借助 5G 网络作为信号数据通信传输通道的可行性。因此,鉴于现有 2.4 GHz Wi-Fi 使用的局限性,在 5G 成熟的条件下,后续新线的建设可以考虑采用 LTE-M + 5G 的双冗余架构。新线车

地通信系统的网络架构和具体建造要求与更新改造线路基本一致,相较于更新改造线路,新线需要在新增 LTE 架构的同时新建 Wi-Fi 或 5G 的架构。

未来城市轨道交通无线传输将考虑采用更先进的通信技术,其双制式可进一步向 LTE-M + 5G 双冗余推进,甚至采用 LTE-M + 6G 或 5G + 6G,以双冗余的状态实现系统的持续演进。

## 5 结语

双制式车地通信系统的使用,既可提升系统的应用性、灵活性及互联互通性,提高传输速率,增强传输的安全性和可靠性,也可在一定程度上避免使用新技术可能带来的风险。这种具备高可用性的双制式无线通信系统,能够实现“纯净”的 CBTC 信号系统(即无需后备模式),保障城市轨道交通的可靠运营。

## 参考文献

- [1] 陈豪,李新,张璟. 地铁数据通信系统典型故障分析及改进[J]. 铁道通信信号,2017(7):77.  
CHEN Hao, LI Xin, ZHANG Jing. Typical fault analysis and improvement of metro data communication system[J]. Railway Signalling & Communication, 2017(7):77.

(下转第 55 页)