

城市轨道交通车地无线通信技术的 演进历程及未来发展

潘威炜

(上海申通地铁集团有限公司技术中心, 201103, 上海//工程师)

摘要 从通信安全要求及多业务通信的角度,讨论了车地无线通信业务需求。概述了车地无线通信技术的发展历程,叙述了当前用于城市轨道交通领域的主要车地无线通信技术,并进一步提出了未来车地无线通信的主要应用方向和面临的挑战,着重探讨了功能安全与信息安全融合的应用与挑战。

关键词 城市轨道交通;车地无线通信;发展历程

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.033

Development Progress and Future of Urban Rail Transit Vehicle-wayside Wireless Communication Technology

PAN Weiwei

Abstract From the perspective of communication safety requirement and multi-business communication, the vehicle-wayside wireless communication business requirement is discussed. The development and evolution history of communication technology is summarized. The major vehicle-wayside wireless communication technology applied in urban rail transit field is expounded, and the future application direction and challenges are further promoted. The application and challenge in functionality safety and information safety integration is emphatically discussed.

Key words urban rail transit; vehicle-wayside wireless communication; development history

Author's address Technical Center of Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China

随着无线通信技术的发展,城市轨道交通车地通信的手段均在不断变化,经历了由模拟到数字的转变。受频谱资源的限制,车地通信的通信频段不变化,如微波通信频段、ISM(工业、科学、医疗专用)频段、公众通信频段及其他专用通信频段等。与商用无线通信系统相比,城市轨道交通通信系统应具

有更高的实时性和安全性。

从通信业务上看,早期车地通信主要向列车传送轨道占用信息,服务于列车调度,采用模拟集群通信技术,有效地满足了调度员与司机间的通信要求。近年来,随着智慧地铁时代的到来,车地通信业务不断丰富,出现了无线列车广播、车载乘客信息系统、客室视频监控、列车状态数据采集等应用要求。随着 OFDM(正交频分复用)及 Massive MIMO(大规模天线)等关键技术在无线通信中的不断应用,无线通信带宽从早期的 kbit/s 级别迅速提升到百 Mbit/s 级别,为智慧地铁业务的实现提供了有力支撑。

本文从安全要求及多业务的角度,讨论了车地无线通信业务需求,以及车地无线通信的发展及演进历程,并从 5G(第五代移动通信技术)应用角度,对未来车地无线通信的发展趋势进行了展望。

1 城市轨道交通业务对无线通信的要求

城市轨道交通 CBTC(基于通信的列车控制)、无线调度、列车广播、乘客向导、视频监控等系统均通过车地无线通信系统进行数据传输。通常,城市轨道交通列车最高运行速度为 80 km/h。车地无线通信系统应该满足地铁在不同环境下高速移动工况的通信需要,能实现信息的持续、动态、可靠传输。但依靠单独的信息设备无法实现空间范围内的全覆盖,故需借助切换技术来实现连续通信。

目前城市轨道交通车地无线通信典型业务,以及对可靠性、安全性及信息和网络安全方面的要求,如表 1 所示。

2 车地无线通信技术的演进

早期,为保证列车安全运行,车地间通信通过轨道电路实现。后来,无线列车调度系统,也称无线

表 1 城市轨道交通车地无线通信典型业务及要求^[1-2]

Tab. 1 Typical services and requirements of vehicle-wayside wireless communication of urban rail transit ^[1-2]				
业务	传送业务	传输速率要求	业务性质	SIL(安全性完整性等级)要求
列车控制	线路数据、应答器数据等	3 Mbit/s(极差情况下,应至少保证 1 Mbit/s)	与行车安全强相关	SIL4
无线列车调度系统	话音业务和少量数据业务	上下行传输速率至少 100 kbit/s	与行业安全有关	SIL 3
列车运行状态	利用传感器采集列车电流、电压、轴温、车下转向架、车辆悬挂系统、发动机、制动器等设备的关键参数等	至少 100 Mbit/s	与行车安全有关	SIL 2
广播业务	通告列车运行、安全以及导线等服务信息以及背景音乐;在突发情况下,人工应急广播数据	通常应支持双向 2 路 64 Mbit/s	专用业务	SIL 2
视频监控系统	视频监控系将列车驾驶室、列车车厢的视频监控图像通过无线的方式传输到控制中心;通过无线网络将实时监控录像传送到地面监控站进行监控	上行传输速率决定于图像的压缩格式、摄像机数量和摄像机类型,每路视频至少 4 Mbit/s	专用业务	SIL 2
PIS(乘客信息系统)	列车到发时间、转播电视节目、播放监视画面;所有的数据传输都是下行传输,通常是高清视频;紧急文本信息在火灾、阻塞情况下,提供紧急疏散指示	至少 4 Mbit/s	专用业务	SIL 2
智能业务	将地铁客流的实时变化传递至列车控制系统,进行列车运行时刻表的优化,实现传统地铁系统的智能调度;智能列车健康监测系统依托所收集的列车运行数据,通过故障检测算法对列车故障类型、故障位置等进行判断	暂无文献报道	专用业务	SIL 2
公众移动通信	公众电话、上网及游戏等服务	根据用户需要	公众业务	无

集群通信系统,为控制中心调度员、车辆段调度员、车站值班员等固定用户同列车司机、防灾人员、维修人员等移动用户之间提供迅速、有效的通信。

目前,城市轨道交通需要进行车地无线通信的应用业务主要包括 CBTC、列车运行状态检测系统、无线列车调度系统、车载视频监控系统、乘客信息系统,以及智能运维系统等;通信应用业务范围从传统的单一承载向综合承载趋势演进。

2.1 集群通信技术的演进

早期的集群通信系统采用模拟集群通信技术;第 2 代集群通信系统大多采用窄带数字集群通信技术;近年来,随着 LTE(长期演进)技术的商用化,逐步实现了宽带多媒体集群系统。典型的宽带集群系统有 LTE 数字传输+集群语音通信系统及基于 B-TrunC 标准的专网宽带集群系统等。

2.1.1 TETRA(泛欧集群无线电)系统

通常,TETRA 系统采用第 2 代数字移动通信技术,可提供 518 kbit/s 的峰值通信速率,其通信频点通常采用 800 MHz,是目前国内城市轨道交通领域主要采用的技术。

2.1.2 基于 TD-LTE(长期演进时分双工)技术的集群通信系统

近年来,随着 LTE 的商用化,推出了基于 TD-LTE 技术的车地无线通信系统,可实现上、下行峰值速率分别达 50 Mbit/s 及 100 Mbit/s,以满足列车控制信息、语音调度、车载视频监控、高清视频播放传输等多种业务的实时双向交互需求,实现一网多能的要求。基于 TD-LTE 技术的车地无线通信系统作为专用、完整和独立的通信系统,把地铁各子系统联成一个有机整体,不仅提供了专用的高速数据传输通道,还可承载语音、视频等多媒体调度业务,完成语音集群通信、语音广播、视频通话、视频分发、视频监控等业务的承载,实现了极小的切换时延、传输时延极严格的 QoS(服务质量)机制。

为满足可靠性要求,基于 TD-LTE 技术的车地无线通信系统采用了网络层与业务层隔离、空口加密、双向接入认证、专用频段等专用技术,采用核心网异地容灾及无线网双网互备等设备配置方案;并采用 ICIC(小区间干扰协调)、定向切换、多普勒频偏预矫正等专用的车地通信无线资源管理算法,具有高抗干扰性和较好的业务连续性。

2.1.3 B-TrunC 宽带集群通信

B-TrunC 是由宽带集群产业联盟组织制定的 LTE 数字传输 + 集群语音通信专网宽带集群系统标准,也是 ITU(国际电信联盟)唯一推荐的宽带集群空中接口标准。2015 年我国工信部颁布了 1.4 GHz 和 1.8 GHz 专网频点,用于政务、公共安全及行业专用通信网络,采用 TDD(时分双工)方式建设宽带集群系统,并成为公安部门宽带系统空口标准。

B-TrunC 的特性为大规模组网技术、增强的集群安全、丰富的业务能力、跨集群核心网的移动性管理及互联互通。B-TrunC 在保证安全可靠的基础上,向更高带宽、更低时延和更多连接的 5G 方向演进。设计时应重点关注 NSA(网络存储)组网 + 双连接、针对 5G NR(空口设计的全球性 5G 标准)的新频谱分配方案,包括 1.4G LTE 与 5G NR 频谱共享技术和 ISM 频谱技术,以满足低时延、高可靠和超连接的要求。

2.2 CBTC 系统中的车地无线通信

CBTC 系统具有更安全、可靠和稳定的特点。

2.2.1 通信频段

为保障车地无线通信系统的抗干扰性能,我国 CBTC 系统从 ISM 频段转向 LTM-M 技术下专用频段(1.8 GHz)。传统的城市轨道交通车地无线通信网络主要采用基于 IEEE 802.11 标准的 WLAN(无线局域网)技术。WLAN 技术采用双网覆盖技术,实现了专网专用,并采用跳频技术来保障车地无线通信的安全性,但其工作在 ISM 频段,易受到来自公众 WLAN 设备信号的干扰。WLAN 的应用频段完全受限于相关技术标准的限定,已没有对频段灵活配置、组合运用的余地,在多业务并发时无法按照优先级调度,无法保证按高优先级业务的实际使用带宽,故其不适用于综合承载。随着车地无线通信技术的发展,基于 LTE 技术的车地无线通信系统逐渐完善和成熟。适用于车地无线通信的 LTE-M 工作在推荐的 1.8 GHz 频段,能有效减少信号的干扰,但其通信频带仍在一定程度上受到限制。

2.2.2 无线信号覆盖

城市轨道交通运营环境复杂,对安全性、可靠性要求极高。为满足车地通信要求,无线信号覆盖方式主要有定向天线、泄露电缆和裂缝波导管等。

基于 IEEE 802.11 系列标准的 WLAN 通常采用空间自由波和波导管两种方式。AP(无线接入点)的传输速率与列车的运行速度基本无关,但受

地形变化所带来的多径影响,以及列车快速运动带来的多普勒效应等,WLAN 信号的传输速率会受到较大程度的影响。相较于其他天馈系统,泄露电缆信号覆盖更均匀,尤其适用于地铁隧道等狭长空间,可减小信号阴影及遮挡,受填充效应影响小。泄露电缆支持较宽的工作频带,故多种不同无线系统的信号可共享同一漏缆进行传输,避免了多个专业系统施工安装的重复性。

考虑到 CBTC 系统对安全性的特殊要求,CBTC 系统通常采用红网和蓝网双覆盖的形式,以提高可靠性和可用性。

2.2.3 安全专用通信技术的应用

受开放性及标准化的通信协议等的限制,应用于 CBTC 系统等城市轨道交通安全性要求高的无线通信易受到干扰、窃听、重放等攻击。而专用频段及专用通信网可在一定程度上缓解干扰的影响,但安全风险仍然较高。为进一步保证通信的安全性和可靠性,通常要采用专用技术,以进一步避免干扰、重放和窃听等。目前,主要采用跳频扩频通信技术, RSSP-1、RSSP-2、FSFB/2 等专用通信协议,以及冗余通道相互验证技术等。

目前,面对无线通信开放性,针对协议标准化的城市轨道交通通信特征,车地通信功能安全和信息安全技术措施仍不够有力,需进一步研究。

3 未来车地无线通信的应用及挑战

随着智慧地铁发展,众多应用场景对车地无线通信带宽及性能提出更高要求。5G 拥有低延时、高可靠、超连接和大宽带的特性,为城市轨道交通行业的智能化应用奠定了基础。与 LTE 技术相比,5G 在频谱利用率和资源利用率等方面有更好的表现,是当前新的研究方向^[3]。未来,车地无线通信的主要应用方向及挑战也与现在不同。

3.1 综合承载

综合承载将成为城市轨道交通车地通信的新方向及挑战。5G 基于端到端的全新体系架构,采用全新频段、多天线、波束赋型等先进技术,具有超宽带、超低延时、大规模连接等特性,为实现城市轨道交通多业务的综合承载奠定了带宽基础。为保证基于 5G 的车地无线通信安全,通常采用 QoS 技术将业务分成不同等级,以满足不同的服务等级要求。由于 CBTC 系统对信息传输时延要求高,因此,虽然综合承载采用了 QoS 技术,但在分组通信

时仍可能会因网络拥塞等原因,导致无法在给定时间内完成车地无线通信作业。因此,基于 5G 综合承载的车地无线通信系统仍需进行长时间的现场测试和验证。

5G 工作在毫米波频段,其频谱资源丰富且具有较大的连续带宽,通常采用大规模多天线传输技术,以实现高效的传输效率。针对 5G 的频点,目前国际上并没有相关标准,普遍认为毫米波频段较为合理。采用该频段时,无线信号传播通常采用低功耗设备,隧道内通信距离通常会小于 100 m,需部署更多的接入设备。密集地部署接入设备,对通信系统的维护和管理带来了一定的压力。在城市轨道交通领域部署和实现 5G 网络通信仍具有挑战性。

3.2 功能安全和信息安全的融合及挑战

比起传统无线通信技术,5G 网络通信安全性更具优势。其提供了支持多种接入方式和接入凭证的统一认证框架,可满足多种应用场景中的安全保护需求,并为用户提供隐私保护。由于城市轨道交通是安全苛求系统,随着其智慧化应用进一步拓展,在要求确保功能安全的前提下,信息安全也已成为城市轨道交通领域重要保障。在智慧地铁时代,列车一旦受到攻击,就可能会影响列车的功能安全。例如,当 CBTC 系统受到无线信号强干扰时,车地间会无法通信,进而影响列车运行。

列车的运行控制和管理在实现智能化后,在更具开放性的同时,也更易受到各种攻击。为此,在提升智能化管理水平之前必须明确智慧地铁和全自动无人驾驶系统融合的安全域以及安全域的安全需求,并应在设计和实施时充分关注列车的功能安全与信息安全,完成两者的统一设计与实现。

4 结语

车地无线通信是城市轨道交通车地通信的重

要组成,其安全性、可靠性和可用性直接影响着城市轨道交通运行的稳定和安全。本文概述了车地无线通信技术的发展过程,叙述了当前用于城市轨道交通领域的主要车地无线通信技术,并基于 5G 进一步提出了未来车地无线通信的主要应用方向和面临的挑战,着重探讨了功能安全与信息安全融合的应用与挑战。

参考文献

- [1] 刘洋. 城市轨道交通全自动运行模式下的车地无线综合通信网络方案分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019(12): 29.
LIU Yang. Analysis of train/ground wireless communication under full automatic operation mode of urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2019(12): 29.
- [2] 高翔. 5G 移动通信技术在城市轨道交通车地无线通信系统中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2018(增刊2): 61.
GAO Xiang. Application of 5G mobile communication technology in urban rail transit vehicle-ground wireless communication system[J]. Urban Mass Transit, 2018(S2): 61.
- [3] 邹劲柏, 张科博, 洪翔, 等. 5G 在城市轨道交通中的应用前景分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019(9): 147.
ZOU Jinbai, ZHANG Kebo, HONG Xiang, et al. Analysis of application prospect of 5G technology in rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2019(9): 147.
- [4] 崔国斌. 基于 TD-LTE 技术的承载地铁集群通信业务相关问题分析[J]. 信息通信, 2017(1): 255.
CUI Guobin. Analysis of problems related to bearing metro clustering communication service based on TD-LTE technology[J]. Information & Communications, 2017(1): 255.
- [5] 丁树奎. 组合传输在城轨信号系统中的应用分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011(4): 55.
DING Shukui. Application and analysis of combination transmission in urban rail transit signal system[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011(4): 55.

(收稿日期:2020-08-18)

(上接第 148 页)

- [7] 杜贵府, 张栋梁, 王崇林, 等. 直流牵引供电系统电流跨区间传输对钢轨电位影响[J]. 电工技术学报, 2016(11): 129.
DU Guifu, ZHANG Dongliang, WANG Chonglin, et al. Effect of traction current transmission among power sections on rail potential in DC mass transit system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016(11): 129.
- [8] DU G, WANG C, LIU J, et al. Effect of over zone feeding on rail potential and stray current in DC mass transit system[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016: 1.
- [9] 刘聪. 再生电能吸收装置在城市轨道交通牵引供电系统中的建模

与仿真[D]. 成都:西南交通大学, 2016.

- LIU Cong. Modeling and simulation of inverter feedback devices in urban rail traction power supply system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [10] 刘炜, 娄颖, 张戡, 等. 计及城市轨道交通再生电能吸收装置的交直流统一供电计算[J]. 电工技术学报, 2019(20): 4381.
LIU Wei, LOU Ying, ZHANG Jian, et al. Unified AC/DC power supply calculation taking into account urban rail inverter feedback devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019(20): 4381.

(收稿日期:2022-03-21)