

上海轨道交通 9 号线 CBTC 系统故障 案例分析及其应对措施^{*}

朱 俊

(上海申通地铁集团有限公司, 201103, 上海//工程师)

摘 要 介绍了上海轨道交通 9 号线 CBTC(基于通信的列车控制)系统通信丢失事件案例的基本情况,综合运用车地无线通信原理和现场电磁环境监测数据,分析得到发生该故障的根本原因是受外部信号干扰。从设备更新、管理配套角度,提出了加速推进 1.8 GHz 频段无线综合承载改造、增强沿线既有无线设备的抗干扰能力、健全无线电管理机制、提升电磁环境监测能力、加强与外部单位和职能部门的联动等应对措施。

关键词 城市轨道交通;基于通信的列车控制;车地通信故障

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.11.029

Failure Case Analysis and Countermeasures of CBTC System of Shanghai Rail Transit Line 9

ZHU Jun

Abstract The investigation information of CBTC (communication-based train control) communication loss issue for Shanghai Rail Transit Line 9 is introduced. By comprehensively adopting train-wayside wireless communication principle and the field electromagnetic environment monitoring result, it is analyzed that the root cause of the failure occurrence is external signal interference. From the perspective of equipment renewal and management support, countermeasures are put forward, such as accelerating the comprehensive wireless bearing construction in 1.8 GHz band, enhancing the anti-interference ability of existing wireless equipment along the line, perfecting the radio management mechanism, improving the electromagnetic environment monitoring ability, and strengthening the interaction with external units and functional departments.

Key words urban rail transit; CBTC; train-wayside communication failure

Author's address Shanghai Shentong Metro Group Co.,

Ltd., 201103, Shanghai, China

2020 年 7 月 1 日 16:00,上海轨道交通 9 号线(以下简称“9 号线”)列车在松江新城站至佘山站上下行区段发生 CBTC(基于通信的列车控制)系统通信丢失故障,直接影响该线晚高峰运营;该线的肇嘉浜路站、徐家汇站、桂林路站、漕河泾开发区站等车站因客流积压先后采取了大客流管控措施,造成了较大的社会影响。本文对此次 CBTC 故障的原因进行深入分析。

1 故障案例的基本信息

CBTC 系统是经实践证明的先进的列车控制技术,通过无线通信链路连接列车控制系统中的车载设备、轨旁设备,以及运营控制中心设备,实现轨道沿线与运行列车之间的双向通信,实时、动态地传送列车的控制信息。CBTC 系统的无线通信部分由信号系统集成商进行集成建设。目前,上海城市轨道交通线网中采用 CBTC 的线路,其无线通信均采用了 Wi-Fi(无线保真)技术。9 号线 CBTC 系统由上海电气泰雷兹开发建设,该系统在轨旁无线 AP(接入点)和车载 SA(站点)之间提供多条冗余的 Wi-Fi 链路,以提高系统的抗干扰能力。若车地通信的故障时间超过 3 s,列车将会减速;若超过 12 s 仍没有恢复移动授权,则列车会立即施加紧急制动,以保证行车安全。

9 号线本次故障区段为地上区段。CBTC 系统故障发生后,通过技术排查和分析,确定存在外部信号干扰,导致故障区段内多个轨旁 AP 无法正常工作,列车进入被干扰区域后 CBTC 系统车地通信完全中断。在相关政府部门的协助下,上海城市轨

^{*} 上海申通地铁集团有限公司博士后科研工作站项目(LS21R063)

道交通运营单位于 7 月 2 日凌晨定位到外部干扰源。在屏蔽了外部的干扰源后,9 号线 CBTC 系统于 7 月 2 日运营开始前恢复正常运行。

2 故障原因分析

2.1 9 号线 CBTC 系统车地无线通信工作原理

如图 1 所示,9 号线 CBTC 系统车地无线通信基于 IEEE(电气电子工程师协会)制定的 WLAN(无线局域网)802.11 系列标准,工作频段为 2 402 ~ 2 480 MHz,通过伪随机方式在 79 MHz 工作频段内进行跳跃,载波带宽为 1 MHz。根据 802.11 标准中的 CSMA/CA(载波侦听多点接入/避免冲撞)信道接入协议,轨旁 AP 或车载 SA 发送数据前需先进行载波侦听,侦听的门限值为 -84 dBm。若 AP 或 SA 侦听到功率大于 -84 dBm 的信号,则会认为当前载波频段被占用,将在等待/退避一段时间后按照跳频图案跳至另 1 个载波频率重新进行信道侦听。在 2.4 GHz 全频段范围内共有 79 个频点可供跳频,这使得该车地无线通信系统可以避开干扰,在其他频点进行信息的重发。由于重新传输所导致的时延很小,不会给列车控制系统带来影响。

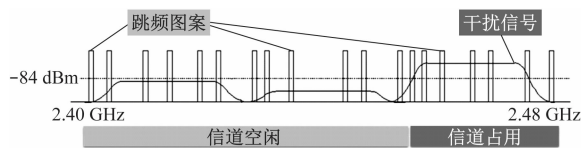


图 1 9 号线 CBTC 系统车地无线通信工作原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of working principle of CBTC train-wayside wireless communication system of line 9

2.2 故障原因分析

由于干扰信号的持续压制,故障区段的 Wi-Fi 设备在任意载波频段上进行载波侦听时结果均为信道占用,导致该车地无线通信系统无法有效地传输数据帧,冗余链路设计失效,车地数据通信彻底中断。

2.4 GHz 频段属于国内免许可的 ISM(工业、科学和医学)开放频段,因此该频段在各领域得到了广泛使用。利用开放的 2.4 GHz 频段进行 CBTC 系统无线通信这一设计理念,是线路设计时缺乏城市轨道交通专用无线通信频段条件下的无奈选择。近年来,随着终端智能技术的发展及大量的 2.4 GHz 无线产品的应用,压缩了 CBTC 车地无线系统的使用空间,严重干扰了城市轨道交通信号 CBTC

系统的正常运行。2019 年 3 月上海城市轨道交通 6 号线的巨峰路站、2020 年 6 月上海城市轨道交通 8 号线的济阳路站先后发生了受外部信号干扰影响而导致运营晚点的事件。

3 故障整改措施

综上所述,需要根据实际的无线环境做出相应的措施改进。

3.1 加速推进 1.8 GHz 频段无线综合承载改造

2015 年 2 月,工业与信息化部发布了《关于重新发布 1 785 ~ 1 805 MHz 频段无线接入系统频率使用事宜的通知》,明确指出 1 785 ~ 1 805 MHz 频段可用于城市轨道交通行业专用通信。此后,中国城市轨道交通协会积极推进 LTE(长期演进)技术在城市轨道交通中的应用。和 Wi-Fi 技术相比, LTE 技术具有以下优势:① 使用了城市轨道交通专用频率,可提高抗外部干扰能力;② 支持高速移动场景,具有良好的切换性能;③ 采取安全分层架构,网络受到的安全威胁较低;④ 可以大量减少区间设备,提高系统的可维护性。

上海城市轨道交通已迈入了超大规模城市轨道交通运营管理的新阶段。为了更好地满足新形势下对行车控制、运营调度和移动信息传输综合承载等方面的要求,上海城市轨道交通布局了 LTE-M(城市轨道交通用长期演进)的建设规划,用于承载以 CBTC 为核心的综合性业务。LTE-M 在有效保障行车安全类系统通信的高可靠性和低时延需求的同时,还满足了非行车安全类系统通信的基本需求。随着各类电磁兼容导致的安全隐患逐渐显现,基于非授权频段的 2.4 GHz 无线 CBTC 系统需要尽快向 1.8 GHz 的 LTE 专用频率网络演进,因而,建议全网络加快实施 1.8 GHz 频段无线综合承载的建设工作,并采用分步实施的方式对既有线路进行改造,以降低外部干扰所带来的运营风险。

3.2 增强轨道沿线既有线无线设备的抗干扰能力

轨道沿线新建的运营商基站有可能导致无线产品的“饱和”问题。“饱和”是指接收机在接收有用信号时,受到接收频带两旁或接收频带内强信号的干扰,导致接收机功率饱和而阻碍通信。现有运营商基站的发射功率均很大,通过现场测试发现,其进入轨旁 AP 和车载 SA 的功率强度一度可超过 -20 dBm,该强度的信号会导致现有轨旁 AP 和车

载 SA 信号的“饱和”。为了避免这类情况的发生,需要在轨旁 AP 箱外和车载 SA 上采取串联安装 2.4 GHz 带通滤波器的方案,来避免运营商大功率基站对轨旁 AP 和车载 SA 的影响。通过在轨旁 AP 和车载 SA 外增加 2.4 GHz 带通滤波器,可以有效保护 CBTC 的 2.4 GHz 频段,并完全隔离 2.4 GHz 频段以外的无线信号,避免非 2.4 GHz 的无线信号进入 CBTC 系统。

当列车关联 AP 后,车地通信的数据包必然需要在经过局域网主用交换机传到骨干网交换机后再转给中央或者集中站的 ATP(列车自动保护)设备。当轨旁 AP 或者车载 SA 受到无线干扰影响无法正常通信时,局域网主用交换机上也不存在故障时间段内的车地通信数据包。针对此情况,可以对局域网主用交换机与骨干网交换机的通信端口进行抓包。在故障发生后,可以通过分析故障时间段内的数据通信包,快速定位故障点,确认故障是否为无线环境受到干扰。

3.3 健全上海城市轨道交通的无线电管理机制

为了切实、有效、安全地在上海城市轨道交通范围内使用各类无线通信系统,成立了上海城市轨道交通无线电管理机构,以统一规划和管理上海城市轨道交通范围内的无线电频率和技术。该机构的职责主要包括:① 统一分配和管理上海城市轨道交通范围内的无线电频率资源;② 评估上海城市轨道交通范围内的无线技术应用风险;③ 形成上海城市轨道交通各线路(尤其是高架露天线路)沿线的相关无线电管理规定;④ 牵头排查上海城市轨道交通范围内的无线电干扰;⑤ 对上海城市轨道交通范围内投用的无线设备进行检测;⑥ 了解无线通信的前沿技术,结合城市轨道交通实际的使用需求,为上海申通地铁集团有限公司提供技术建议。

3.4 提升上海城市轨道交通电磁环境的监测能力

研究无线信号电磁环境的场强实时监测方案,在城市轨道交通线路运营期间,全方位、无死角地动态监测城市轨道交通线路轨行区间的无线电磁环境,记录无线电频谱资源的占用情况,供信号维护人员及时掌握线路沿线的无线电磁环境变化特点及风险。

成立上海城市轨道交通无线电监测处置小组,其职责主要包括:完善外部干扰源检测的手段与方

式;监测上海城市轨道交通范围内的各种无线电频段,尤其加强对关键系统同频率信号干扰源的监测;针对监测发现的问题,及时定位外部干扰源的位置,并根据预案实施处置。

3.5 加强外部联动合力攻坚

对接上海市有关职能部门,对影响城市轨道交通运营的外部干扰信号源,做好应急联动处置工作。积极与相关单位进行沟通和联系,及时了解更新已报备的潜在干扰源设备的具体位置及干扰范围,结合干扰设备的技术特点针对性地完善相应范围内城市轨道交通无线设备的抗干扰性能,并提前做好处置预案。

积极推进与上海市有关职能部门的合作交流,通过委托培养、共建队伍等方式,强化上海城市轨道交通无线电监测处置小组人员的能力建设。联合上海市有关职能部门,定期开展针对外部干扰的联动应急实战演练,并进行总结交流,以积累宝贵经验,进一步修改、完善应急处置预案,全面提高故障的应急处置能力,最大限度降低故障对运营的影响。

4 结语

本文针对上海轨道交通 9 号线 CBTC 系统通信丢失故障案例,结合 CBTC 系统的无线通信机制,分析了故障案例的根本原因,并通过有效的整改措施,全面加强了上海城市轨道交通无线电的规划和管理,进一步提升了上海城市轨道交通无线电发生突发干扰事件后的应对和处置能力,切实保障上海城市轨道交通无线电通信的安全、畅通、有序。

参考文献

- [1] 陶小婧. 上海轨道交通 CBTC 系统无线车地通信研究及通信异常分析[J]. 上海工程技术大学学报, 2017(2):149.
TAO Xiaojin. Analysis on wireless TWC and abnormal communication for CBTC system of Shanghai rail transit[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2017(2):149.
- [2] 肖彦博. 谈城轨交通 CBTC 系统故障归类及其设计应对策略[J]. 现代城市轨道交通, 2011(3):12.
XIAO Yanbo. Fault classification and design countermeasures of CBTC system in urban rail transit[J]. Modern Urban Transit, 2011(3):12.

(收稿日期:2021-04-27)