

上海城市轨道交通无线监测系统研究*

朱俊^{1**} 张羽中² 张郁² 曾贵华³

(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 日益复杂的无线电磁环境给城市轨道交通无线设备的正常使用带来了很大的干扰,甚至会影响列车的运行安全。为此,建立一个适合上海城市轨道交通使用的无线监测系统,对可能出现的干扰进行预警,并在干扰产生影响后快速响应,显得尤为重要。通过对上海城市轨道交通无线监测的特点与需求进行深入研究,认为目前上海城市轨道交通无线监测的建设重点是采用移动监测的方法,对重点频段的电客列车加装车载监测设备。在上海轨道交通 5 号线部分正线区段应用该无线监测系统进行测试,验证了移动监测部分功能的可行性。

关键词 城市轨道交通; 无线干扰; 无线监测系统; 移动监测

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.11.019

Research on Wireless Monitoring System of Shanghai Urban Rail Transit

ZHU Jun, ZHANG Yuzhong, ZHANG Yu, ZENG Guihua

Abstract The increasingly complex wireless electromagnetic environment has brought tremendous interference to the normal use of urban rail transit wireless equipment, even to the safety of train operation. For this reason, it is particularly important to establish a wireless monitoring system suitable for Shanghai urban rail transit, to provide early warning of possible interference, and to respond quickly after the interference has caused impact. Through in-depth research on the characteristics and requirements of Shanghai urban rail transit wireless monitoring, it is believed that the current construction focus of Shanghai urban rail transit wireless monitoring is to adopt mobile monitoring methods and to install on-board monitoring equipment for electric passenger trains in key frequency bands. The wireless monitoring system is applied to part of the main line sections of Shanghai Rail Transit Line 5 for testing, which has verified the

feasibility of mobile monitoring functions.

Key words urban rail transit; wireless interference; wireless monitoring system; mobile monitoring

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

1 背景与现状分析

无线通信系统作为城市轨道交通中的重要系统之一,在列车运行时起着无可替代的作用。一旦无线通信受到干扰,很有可能会导致列车晚点和清客,甚至严重影响乘客的出行。

随着近年来无线技术的飞速发展,空间电磁环境日益复杂。对于无线技术高速发展准备不足以及对电磁兼容性管理不够重视,导致无线频谱的使用缺乏长期而有效的监测手段,城市轨道交通沿线的各种无线干扰对城市轨道交通各类无线系统的正常运行产生了影响。为了保证上海城市轨道交通范围内各类无线通信系统的安全、有效运行,建立完善的城市轨道交通无线监测系统已迫在眉睫。

1.1 上海城市轨道交通无线通信系统现状

上海城市轨道交通主要使用的无线通信系统频谱如表 1 所示。在各类无线通信系统中,CBTC(基于通信的列车控制)车地无线通信子系统和 LTE-M(城市轨道交通用长期演进)系统由于和行车控制直接相关,若受到无线干扰更易造成重大的运营影响。CBTC 车地无线通信子系统的工作频段为 2.4 GHz。由于 2.4 GHz 是完全公开的,任何运营商、企事业单位和个人用户均可使用该频段,从而导致了 2.4 GHz 频段的潜在干扰风险极大。LTE-M 系统的工作频段为 1 785 ~ 1 805 MHz,其中:1 800 ~ 1 805 MHz 的 5 MHz 频段是上海城市轨

* 上海申通地铁集团有限公司博士后科研工作站项目(LS21R063)

** 通信作者

道交通的专用频段,剩余的 15 MHz 频段是公共频段。LTE-M 虽然比 CBTC 车地无线通信子系统所在的 ISM(工业、科学和医学)频段的干扰风险小很多,但发生各种无线干扰的可能性仍不容忽视。

表 1 上海城市轨道交通主要无线通信系统频谱划分
Tab.1 Frequency spectrum division of main wireless communication systems in Shanghai urban rail transit

系统名称	频段/GHz
TETRA(泛欧集群无线电)	0.8
LTE-M 系统	1.8
CBTC 车地无线通信子系统	2.4
MMIS(移动互联网系统)	5.8

1.2 上海城市轨道交通既有无无线通信系统的问题分析

近年来,由于上海城市轨道交通区域内无线干扰事件频繁发生,庞大的城市轨道交通网络受到了巨大的运营压力。然而,上海城市轨道交通无线干扰监测的手段却十分匮乏,仅有几台手持式监测设备和少数精通无线监测的人员,这跟繁重的监测任务相比显得捉襟见肘。

由于没有长期且有效的无线环境监测手段,无法实时监测城市轨道交通区域内及周边沿线的电磁环境,导致了上海城市轨道交通运维人员只有在发生无线干扰引发无线通信系统故障的情况下才能确认干扰的存在。此时再通过现场人员手持设备对干扰源进行排查,并与相关部门沟通协商解决故障,导致故障的处置时间较长。

2020 年 7 月 1 日,9 号线松江新城站一佘山站区段内列车发生 CBTC 信号通信丢失故障。该故障直接影响 9 号线的晚高峰运营,多个车站因客流积压采取了大客流管控措施。整个故障处置历时 9 h 43 min,通过多家单位联合排查,才最终找到位于洞泾站西南方向的干扰源。

这种被动且低效的方法显然已无法适应上海城市轨道交通超大规模运营的要求。面对越来越复杂的电磁环境,为了能够更快速地应对可能出现的故障,必须结合实际的运维条件,对无线环境监测的技术和手段做出相应的改进。

2 上海城市轨道交通无线监测的整体架构及功能需求

2.1 城市轨道交通无线监测的特点

无线环境监测一般分为固定监测和移动监测 2

方面。由于城市轨道交通无线通信系统呈线状覆盖,如果使用固定监测,即采用在沿线新增大量设备以覆盖全线区域的方式,不仅设备的安装位置很难规划,还会造成极大的资源浪费。而如果只在若干重点站安装监测设备,实际取得的监测效果并不理想。因此,在选择无线监测设备时应主要考虑以移动监测为主,快速落实重点频段电客列车车载监测设备的配备。这样既可为干扰的应急响应奠定扎实的基础,也能为后续逐步完善无线环境监测体系打下重要的数据基础。

2.2 城市轨道交通无线监测的整体架构

基于以无线移动监测为主的原则,上海城市轨道交通无线监测系统的整体架构如图 1 所示。

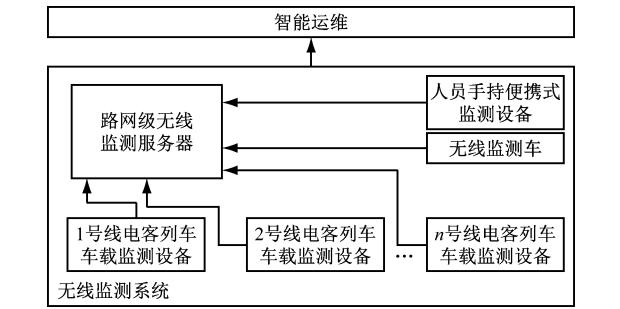


图 1 上海城市轨道交通无线监测系统的整体架构示意图
Fig.1 Schematic diagram of the overall architecture of Shanghai urban rail transit wireless monitoring system

移动监测主要采用在每条线路的电客列车上配备电客列车车载监测设备的方式来收集日常的各种无线参数数据。此外,应以无线电专业化团队为核心成立无线监测处置小组,以无线监测车和人员手持便携式监测设备作为应急故障抢修和精确定位干扰源的手段,由无线监测处置小组统一管理和使用。所有收集到的数据都将上传至无线监测服务器,最终上传至智能运维系统,并进行数据的保存与分析处理。

2.3 城市轨道交通无线监测系统的功能需求

CBTC 系统利用双向连续、大容量的车地数据通信功能对列车实施连续、自动的运行控制。高架、隧道线路的任何区间故障都有可能影响全线的运行秩序,所以无线监测需要完成对沿线所有区间的无线环境监测,而且需要结合高架和隧道线路的不同需求,进行有针对性的专项监测和数据分析。

1) 无线通用指标监测功能:虽然对高架和隧道线路有着不同的监测需求,但是有许多通用指标是监测中必不可少的,如无线频段扫描、信号强度测

量、通信协议解析、信号覆盖分析、无线干扰分析、空口报文监测、无线环境记录等。

2) 高架区间专项监测功能:高架线路的无线环境较为复杂,外部无线信号较多,容易影响车地通信系统的正常运作,所以高架线路的专项监测主要以外部信号的辨识、解析为主,如外部同频信号解析、外部邻频信号解析、外部强干扰定位等。

3) 隧道区间专项监测功能:隧道沿线的无线信号会出现大量的反射和多径效应,进而影响信号质量。因此,在隧道线路内的监测以识别内部信号干扰和设备工作状态为主,如识别天线倾角变化、检测信号切换异常等。

3 无线监测系统的应用测试和效果分析

3.1 无线监测系统的应用场景

在移动监测体系搭建完成后,通过在电客车上部署无线监测装置,可以准确地检测出覆盖和干扰问题。然后基于无线监测装置收集到的数据,通过初步的处理和分析就可以直接应用到上海城市轨道交通的现有环境中,降低上海地铁无线通信系统被干扰的风险。

1) 构建无线环境指纹库:通过对收集到的隧道、车站、高架等线路区段的无线环境数据进行有效管理,可以及时了解无线环境的变化,保证各无线通信系统的正常运行。

2) 外部无线干扰快速定位:在突发无线干扰时,通过城市轨道交通线路高架区段的专项监测,利用干扰定位算法和无线环境指纹库可快速定位干扰的来源和方位,进而有效缩短排除干扰故障的时间。

3) 内部无线干扰排查:由于城市轨道交通内部有许多系统使用的频段十分接近,尤其是在隧道内和站台上,会有很多互相干扰的现象发生。可以使用隧道区间专项监测技术,对车地无线通信空口报文数量和长度等进行实时监测,并对可能存在的内部无线干扰进行定位和排查。

3.2 无线监测系统的测试功能

在上海轨道交通 5 号线的电客列车上装载了无线监测设备,通过对 5 号线银都路站—北桥站区段进行无线监测系统的在线测试,用以验证无线环境指纹库构建功能和在线监测功能。无线监测系统的测试功能模块如图 2 所示。

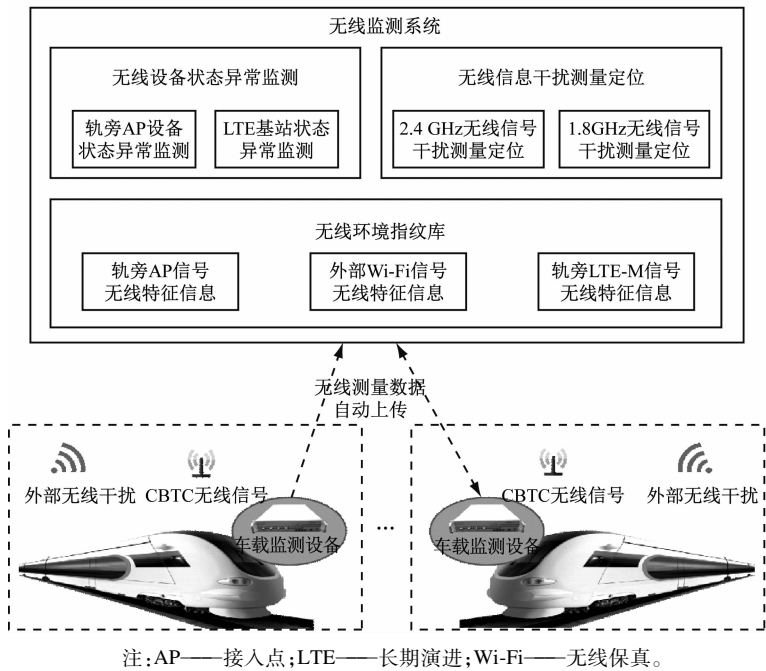


图 2 无线监测系统的测试功能模块

Fig. 2 Test function module of wireless monitoring system

3.2.1 无线环境指纹信息测试

1) 测试概述:采集测试区间每个网格的无线环境数据,并写入无线环境指纹库。

2) 测试流程:将北桥站—银都路站区段线路划分为若干个网格,并对网格进行编号。通过电客列车车载监测设备对每 1 个网格进行无线特征信息采

集,并上传至无线监测系统,生成无线环境指纹信息库。

3) 测试结果:无线环境指纹信息测试结果示例如表 2 所示。

表 2 无线环境指纹信息测试结果示例

Tab.2 Example of wireless environment fingerprint information test results					
设备名称	设备代号	MAC 地址	信噪比/dB	场强/dBm	频率/GHz
轨旁天线	AP0510	24:A4:95:4B:AF:90	30.69	-71.96	2.4
外部干扰设备	HUAWEI-6315	98:E7:F5:D8:63:15		-79.00	2.4
轨旁 LTE-M	71		10.4	-89.62	1.8

注:MAC——媒体存取控制。

3.2.2 轨旁无线设备异常监测

1) 测试概述:随机关闭轨旁 1 个 LTE-M 基站和 1 个 Wi-Fi(无线保真)的 AP,无线监测系统将产生相关告警信息,并在地图上直观显示出告警基站和 AP 的位置。

2) 测试流程:关闭轨旁沿线的某个 AP 和 LTE-M 基站;随后,在列车通过该测试区段时,无线监测

系统通过将实时测量的数据和该区段的历史网格指纹信息进行比对分析,能快速识别出被关闭的轨旁 AP 和 LTE-M 基站,并产生相关告警信息,在地图上直观显示告警基站和 AP。

3) 测试结果:轨旁无线设备异常告警信息测试结果示例如图 3 所示。

内部CBTC设备告警				
日期	时间	类型	告警内容	设备ID号
05-30	01:27:20	(wi)	轨旁AP未检测到	24:A4:95:4B:AA:10
05-30	01:20:20	(l)	LTE小区未检测到	1803600000_71

a) 设备告警信息



b) 设备告警发生地

图 3 轨旁无线设备异常告警信息测试结果示例

Fig.3 Example of trackside wireless equipment abnormal warning information test results

3.2.3 无线干扰的测量及定位

1) 测试概述:发送 2.4 GHz 和 1.8 GHz 干扰信号,无线监测系统将产生相关告警信息,并在地图上直观显示干扰源位置。

2) 测试流程:针对 2.4 GHz 频段,本次测试采用 2.40~2.48 GHz 全频段无线干扰器,通过发送宽频白噪声来干扰轨旁 AP 的正常通信;针对 1.8 GHz 频段,本次测试通过外部测试基站发射同频干

扰信号来干扰轨旁 LTE-M 基站的正常通信。测试列车经过该干扰测试区域后,车载监测测试设备能快速发现来自外部的强干扰信号,并产生相关告警信息。同时,无线监测系统迅速启动反向干扰定位功能,计算干扰源的位置,并在地图上直观显示干扰源位置。

3) 测试结果:无线干扰告警信息测试结果示例如图 4 所示。

外部无线环境干扰告警				
日期	时间	类型	告警内容	干扰信息
05-30	01:27:20	(l)	LTE_M同频干扰	1802500000_201
05-30	01:27:20	(w)	2.4G强干扰	2.4G信道占用率极高
05-30	01:27:20	(w)	2.4G普强干扰	2.4G信道占用率较高

a) 外部干扰设备告警信息



b) 外部干扰设备位置

图 4 城市轨道交通外部无线干扰告警信息测试结果示例

Fig.4 Example of urban rail transit external wireless interference warning information test results