

基于无线电指纹识别算法的无线电磁环境 在线监测系统研究^{*}

王 鹏

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安//高级工程师)

摘 要 传统的电磁环境监测手段无法实现城市轨道交通线路各无线通信系统运行环境的实时在线监测。通过分析传统监测方法的不足,结合无线电指纹识别算法,提出一种实时、在线的电磁环境监测系统及测试方案。以LTE-M(基于长期演进技术的城市轨道交通车地综合通信系统)和TETRA(泛欧集群无线电)技术为例,阐述了无线电磁环境在线监测系统的组成、架构、工作流程及仿真核心干扰识别算法。该研究成果可为城市轨道交通无线通信系统的智能运维提供重要的技术支撑。

关键词 城市轨道交通;电磁环境监测;实时在线;无线电指纹;干扰识别

中图分类号 U285.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.07.006

Research on Online Monitoring System of Electromagnetic Environment Based on Radio Fingerprint Identification Algorithm

WANG Peng

Abstract Conventional electromagnetic environment monitoring methods cannot realize real-time online monitoring of the operating environment of various wireless communication systems in urban rail transit lines. By analyzing the shortcomings of conventional monitoring methods and adopting radio fingerprint identification algorithm, a real-time, online electromagnetic environment monitoring system and test scheme is proposed. Taking LTE-M system and TETRA technology as examples, the composition, architecture, workflow and simulation core interference identification algorithm of electromagnetic environment online monitoring system are expounded. The research results can provide important technical support for intelligent operation and maintenance of urban rail transit wireless communication system.

Key words urban rail transit; electromagnetic environment monitoring; real-time online; radio fingerprint; interference

recognition

Author's address China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 710043, Xi'an, China

城市轨道交通线路沿线的无线电磁环境对无线调度、列车控制等的正常运行至关重要。国内各城市轨道交通线路均受到过不同程度的无线干扰,严重者甚至导致线路的停运或降级运行。

对现有无线电磁环境进行测试的主要方法是在特定时间和地点开展一次性测试。该方式无法实时识别随机产生的外部干扰。随着全自动运行、智能化运维、智慧地铁等技术的全面应用,轨道公司迫切需要研究一种自动化的监测手段来确保线路无线通信系统运行环境的安全。

1 传统无线电磁环境监测方法存在的问题

1.1 传统无线电磁环境监测的具体做法

城市轨道交通无线电磁环境测试分为建设期测试和运营期测试。对其进行监测的传统做法多采用人工测试方法,即在项目建设期(单系统调试前)或运营期,由轨道公司组建无线电磁环境测试团队进行人工测试。测试的具体做法一般为:①依据经验选取沿线合适的目标点;②制定测试规范,明确测试的时间、地点、高程、频段范围;③选择测量的仪器、仪表;④采集各测试点的无线电磁环境数据。在阶段性测试完成后进行后台数据分析,必要时可重复上述测试过程。表1列举了目前国内城市轨道交通行业涉及到的部分无线通信制式^[1]。

1.2 传统无线电磁环境监测方法的问题分析

传统的监测方法存在以下问题:

1) 属于离散型、一次性测试。测试方案仅针对特定的时间和地点进行测试,无法长时间持续测

^{*} 国家自然科学基金项目(61771296);中铁第一勘察设计院科研项目(2021KY40ZD(CYH)-04)

表 1 城市轨道交通线路无线通信的制式及频段

无线通信制式	用途	上行的频段范围/MHz	下行的频段范围/MHz
PDT	公安无线通信	351 ~ 358	361 ~ 368
	应急管理通信	372 ~ 375	382 ~ 385
TETRA	专用集群调度	806 ~ 821	851 ~ 866
	宽带集群调度	1 785 ~ 1 805	1 785 ~ 1 805
LTE-M	车地宽带传输	1 785 ~ 1 805	1 785 ~ 1 805
	信号 CBTC	1 785 ~ 1 805	1 785 ~ 1 805
WLAN 802.11 系列	车地宽带传输	2 400 ~ 2 483	2 400 ~ 2 483
	信号 CBTC	5 725 ~ 5 850	5 725 ~ 5 850

注:PDT——警用数字集群;TETRA——泛欧集群无线电;LTE-M——基于长期演进技术的城市轨道交通车地综合通信系统;CBTC——基于通信的列车控制;WLAN——无线局域网。

试,且测试结果仅对本次测试采样值负责。

2) 数据采集和分析过程分离,缺少数据收集、分析一体化设备。

3) 测试手段受限。除个别的制式信号测试配套了具有解调功能的测试仪,其他频段的信号需要用基础频谱分析仪,对人员现场操作要求较高。因此,测试结论多与测试人员的理论水平和严谨程度密切相关。

4) 干扰识别度受限。对已运营线路进行测试时,难以直观地识别同频干扰信号,必要时还需配合开关本线路基站方可确认干扰。

5) 测试成本较高。测试过程的费用与数据采集点位的数量、制式数量、测试频次等有关,多点位、多频次测量的测试费用较高。

测试的个别领域具有自动化监测或在线监测的设备,如 GSM-R (铁路综合数字移动通信) 系统^[2],但仅能实现对单一制式信号无线电磁环境的监测。而且,该类型设备对同频干扰的识别,或在基带解调后通过基站或信令标识符对比分析来实现,或通过数字荧光频谱显示等单纯基于快速傅里叶变换(FFT)的技术来实现。城市轨道交通线路的无线电磁环境复杂多变,若通过基带解码的方式实现干扰识别,则需配套完整的射频和基带设备,这会造成监测设备软件和硬件的规模巨大、成本昂贵;若采用数字荧光频谱显示技术实现干扰识别,其前提条件是要求干扰信号和授权信号在时域上不完全重合,且对干扰信号强度也有限制^[3]。因此,上述具有自动化监测或在线监测的方案仍存在严重的监测漏洞。

2 无线电磁环境在线监测系统架构

本文提出的无线电磁环境在线监测系统可全方位、实时地监测城市轨道交通线路沿线的无线电磁环境,自动化识别和分析干扰信号。该系统主要由中心设备、前端监测设备、数据传输设备、电源设备等组成。

1) 中心设备。设置于线路的电磁环境监测中心内,负责该系统的配置管理、设备状态管理、数据库管理、告警信息管理,主要包括应用服务器、工作站、数据无线收发单元等。

2) 前端监测设备。作为该监测系统的核心设备,设置于沿线轨旁。负责实时采集所在区域的无线电信号,进行样本信号的预处理、采样、变换、识别,并将初步分析后的数据和告警信息发送至监测中心。

3) 数据传输设备。负责打通前端监测设备和中心设备之间的数据传输通道。

4) 电源设备。负责为中心设备和轨旁设备供电。本文采用交流电源远程供电,可共享地铁沿线专有的供电线缆资源。

如图 1 所示,在城市轨道交通线路沿线选取监测地点以布放前端监测设备。该在线监测系统以实时在线的方式实现全运营时段的无线电磁环境监测、干扰识别分析、告警上报。该系统的主要特征如下:① 可同时在线监测多个制式的无线通信信号;② 数据采集、分析实时化,可快速识别沿线的干

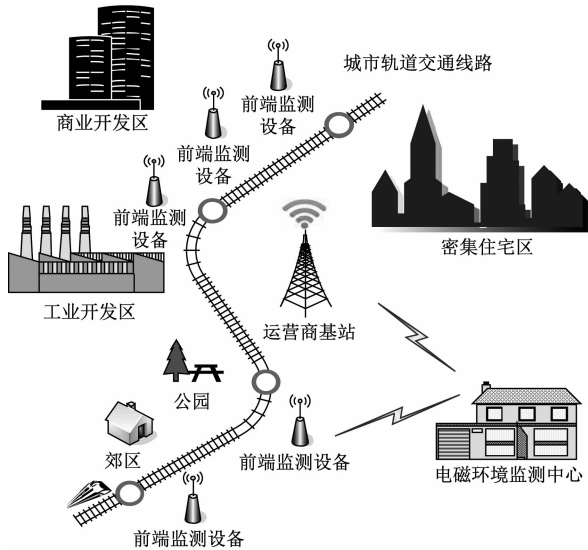
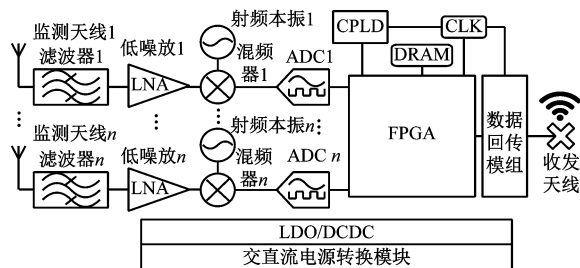


图 1 城市轨道交通线路无线电磁环境在线监测系统组网结构示意图

扰信号并上报告警信息;③ 采用频谱感知、无线电指纹识别算法,同频干扰识别不依赖于基带解调;④ 分布式监测,多点协同感知;⑤ 基于软件无线电架构,易于将设备扩展应用至其他领域。

3 无线电磁环境在线监测系统前端监测设备的硬件架构

将设置在轨旁的前端监测设备设计为室外型产品,前端设备整体采用无风扇自然散热架构。该设备内部主要由射频电路、模数转换电路、数字电路、数据回传模组等成,其硬件架构如图2所示。



注:CPLD——复杂可编程逻辑器件;DRAM——动态随机存取存储器;CLK——时钟;FPGA——现场可编程门阵列;ADC——模数转换器;LNA——低噪声放大器;LDO——低压线性稳压器;DCDC——直流开关电源。

图2 无线电磁环境在线监测系统前端监测设备的逻辑组成示意图

无线电磁环境在线监测系统前端监测设备的硬件架构主要包括:

1) 射频电路。主要包括监测天线、滤波器、低噪放、混频器等,负责采集目标频段内的电磁波,实现射频解调。该在线监测系统应根据应用场景配置多通道的射频电路,以适配于多制式信号。

2) 模数转换电路。主要包括ADC及其匹配电路,负责完成模拟信号到数字信号的变换。该监测系统选用位宽不小于11 bit、采样率不小于200 MHz的高速ADC产品。

3) 数字电路。主要由CPLD、FPGA、DRAM、CLK及电源模块等组成,以实现样本信号的FFT、干扰识别、告警信息生成等。其中:① CPLD负责前端设备内小系统的启动。② FPGA实现FFT算法,对采集的样本信号进行时频域变换;通过能量域感知算法进行频谱变化预分析,进而得到样本信号的特征参数(包括中心频点、带宽、幅度等);对同频干扰信号进行无线电指纹的提取、分类、对比;实现与电磁环境监控中心通信接口数据的处理;在前

端监测设备内预置全线授权无线通信系统空口参数及各基站、终端设备的无线电指纹白名单,便于系统快速、准确识别干扰信号的类别,并提供初步的干扰分析结果;算法模块具备动态学习能力,可对内部的数据库进行更新。③ CLK提供模拟和数字芯片所需的各种时钟信号,包括射频本振、晶体振荡器等。④ 电源模块进行AC、DC供电模式的转换,再通过LDO和DCDC转换出所需的5.0 V、3.3 V、1.2 V等多种电压。

4) 回传模组。负责将前端设备数据实时回传至电磁环境监控中心。该系统采用的是基于运营商物联网的无线传输方案,可最大程度地降低现场施工量,且利于设备位置的灵活调整。

4 无线电磁环境在线监测系统前端监测设备的核心算法

4.1 算法的理论基础

与其他电磁环境自动化监测设备相比,本文提出的无线电磁环境在线监测系统的主要特征在于具备同频干扰信号识别能力。该功能的实现主要通过无线电指纹识别算法提取无线电信号中的杂散成分,以达到无线电设备个体识别的目的^[4]。

无线电指纹识别算法的成功率高低取决于指纹提取算法的选取及分类器的设计。由于杂散信号具有非线性、非平稳的特点,而HHT(希尔伯特-黄变换)在提取非线性、非平稳信号特征方面具有较高的准确率,因此本文选择HHT实现无线电指纹识别算法的提取,并通过MATLAB软件仿真其特征提取效果。HHT包括EMD(经验模态分解)和HT(希尔伯特变换)两部分内容。

4.1.1 EMD

EMD通过对输入信号与其包络均值重复迭代求差,得到若干个IMF(固有模态函数)。将得到的IMF函数线性稳态信号作为希尔伯特变换的输入,原始的输入信号 $s(t)$ 被分解为:

$$s(t) = \sum_{i=1}^k I_i(t) + r_k(t) \quad (1)$$

式中:

t ——时间变量;

k ——待处理分量的数量;

$I_i(t)$ ——IMF函数各分量;

$r_k(t)$ ——分解后的余项。

4.1.2 希尔伯特变换

希尔伯特变换是通过将输入实信号变换至采用复函数域处理的方式,用以提取其瞬时频率、相位、振幅等特征信息。希尔伯特变换过程定义为:

$$H[s(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2)$$

式中:

τ ——积分变量;

$H[s(t)]$ ——经希尔伯特变换后的目标值。

4.2 构建仿真模型

以城市轨道交通 TETRA 下行发射设备为例,构造工作在 855 MHz 下的仿真信号。授权设备信号 $f(t)$ 的计算式为:

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) \quad (3)$$

其中:

$$f_1(t) = 50 \cos(2\pi F_1 t + \varphi_{n-1} + \Delta\varphi_n);$$

$$f_2(t) = 10 \cos(2\pi F_2 t);$$

$$f_3(t) = 0.8 \cos(2\pi F_3 t + \pi/4)。$$

式中:

$f_1(t)$ ——模拟授权信号第 1 个分量, mV;

$f_2(t)$ ——模拟授权信号第 2 个分量, mV;

$f_3(t)$ ——模拟授权信号第 3 个分量, mV;

F_1 ——模拟授权信号第 1 个分量工作频点, 取为 855 000 030 Hz;

F_2 ——模拟授权信号第 2 个分量工作频点, 取为 855 002 000 Hz;

F_3 ——模拟授权信号第 3 个分量工作频点, 取为 855 020 000 Hz;

n ——授权调制信号的码元序号;

ϕ_{n-1} ——第 $n-1$ 个码元的相位, ($^\circ$);

$\Delta\phi_n$ ——TETRA 标准 $\pi/4$ DQPSK 调制信号中第 $n-1$ 个码元和第 n 个码元的相位差^[5], ($^\circ$)。

同频的干扰信号 $x(t)$ 的计算式为:

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) \quad (4)$$

其中:

$$x_1(t) = 40 \cos(2\pi X_1 t + \phi_{m-1} + \Delta\phi_m);$$

$$x_2(t) = 8 \cos(2\pi X_2 t);$$

$$x_3(t) = 0.5 \cos(2\pi X_3 t + \pi/2)。$$

式中:

$x_1(t)$ ——模拟干扰信号第 1 个分量, mV;

$x_2(t)$ ——模拟干扰信号第 2 个分量, mV;

$x_3(t)$ ——模拟干扰信号第 3 个分量, mV;

X_1 ——模拟干扰信号第 1 个分量工作频点, 取为 855 000 090 Hz;

X_2 ——模拟干扰信号第 2 个分量工作频点, 取为 855 008 000 Hz;

X_3 ——模拟干扰信号第 3 个分量工作频点, 取为 855 080 000 Hz;

m ——干扰调制信号的码元序号;

ϕ_{m-1} ——第 $m-1$ 个码元的相位, ($^\circ$);

$\Delta\phi_m$ ——TETRA 标准 $\pi/4$ DQPSK 调制信号中第 $m-1$ 个码元和第 m 个码元的相位差, ($^\circ$)。

信源采用伪随机函数输入。仿真过程附着 10 dB 高斯白噪声。 $f(t)$ 和 $x(t)$ 经过 HHT 处理后得到的时频特征值谱分别如图 3、图 4 所示。提取每个样本信号高频组合分量的归一化特征值, 将其作为其无线电指纹特征。选择支持向量机算法对该指纹特征进行分类和对比, 以便设备自动化识别样本个体差异, 有效分辨出与授权设备同频的干扰设备。

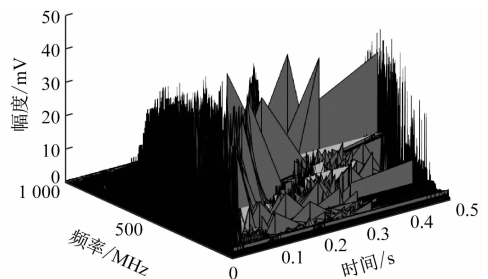


图3 授权设备发射信号 $f(t)$ 的 HHT 时频特征值谱截图

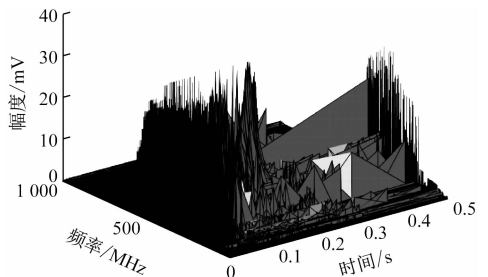


图4 干扰设备发射信号 $x(t)$ 的 HHT 时频特征值谱截图

5 无线电磁环境在线监测系统工作流程

如图 5 所示,以采用 1.8 GHz 的 LTE-M 系统为例,阐述该监测系统对城市轨道交通线路沿线无线电干扰识别和分析的处理流程。该系统对线路电磁环境的监测过程可分为 6 个工作步骤:

1) 在城市轨道交通沿线轨旁以 500 m 左右的间隔布放前端监测设备。

2) 设置中心设备及前端设备的系统参数。设备的扫频范围限定于规范要求的 1 785 ~ 1 805 MHz。将地方无线电管理部门授权本城市轨道交通

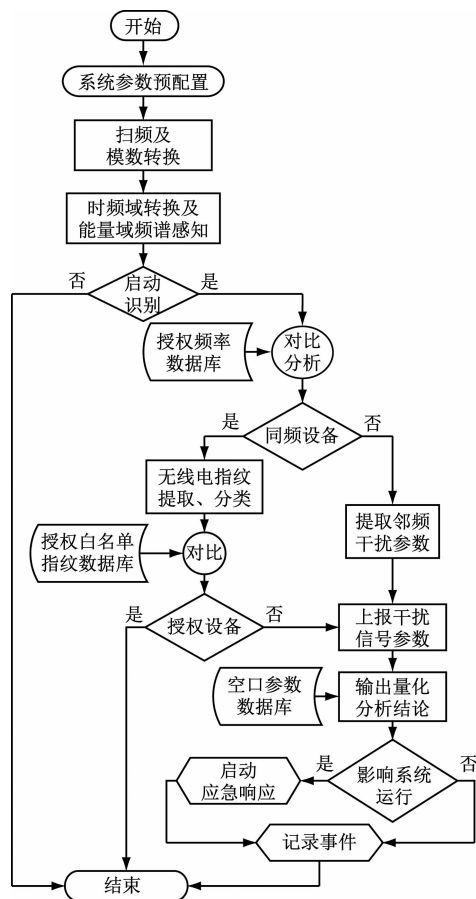


图5 无线电磁环境在线监测系统的信号处理流程

通工程的中心频点、频段宽度,以及预先提取的本工程基站和终端设备的无线电指纹等信息配置到前端设备内。

3) 对样本信号进行射频信号处理,得到样本信号的中心频点、频段宽度、幅度、功率积分等特征信息;将特征信息与授权信号数据库比对,判断样本信号是否为邻频信号或同频信号。

4) 将经过初步分析处理后的样本信号推送至干扰分析流程。对于同频信号,通过 HHT 算法提取其无线电指纹并进行分类,并与授权设备指纹白名单进行比对,判断该同频信号是否为非授权设备发出。

5) 将干扰识别和初步分析的结果回传至电磁环境监控中心。LTE(长期演进)小区间的干扰可等效于离散的窄带干扰,因此 LTE 以同频组网为主^[6]。根据工程经验,LTE-M 的同频干扰保护比一

般不小于 15 dB^[7]。对于邻频干扰,主要评判带外阻塞的影响。在不考虑隔离度时,只要邻频干扰信号不大于 16 dBm/(20 MHz) 即可^[8]满足城市轨道交通无线通信系统正常工作要求。电磁环境监测中心根据城市轨道交通无线通信系统沿线场强分布图,通过量化干扰程度,明确干扰的强度,用以判断是否会对城市轨道交通无线通信系统造成损害,并得出最终结论。

6) 记录无线干扰事件出现的时间及地点等信息,并附有干扰分析和量化的结果。

6 结语

城市轨道交通全自动运行和智能运维场景的实施对其无线通信系统的运行可靠性有着极高的要求。本文提出的无线电磁环境在线监测系统可实现自动化实时识别同频和邻频信号干扰,而不需依赖基带信号的解调。该监测系统集干扰信号的监测、识别、分析等功能于一体,可为城市轨道交通线路的安全运营提供强有力的保障。同时,由于该监测系统基于软件无线电架构和统一算法平台设计,可延伸应用于高速铁路及民用航空领域,具有较高的产业化价值。

参考文献

- [1] 李伟章,杨海江. 城市轨道交通系列丛书:城市轨道交通通信(第二版)[M]. 北京:中国铁道出版社,2013:130.
- [2] 吴宏松. GSM-R 系统运行网络干扰实时监测研究与应用[D]. 成都:西华大学,2014.
- [3] 代赛. GSM-R 系统在线干扰监测技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2013.
- [4] 张敏,罗正华,黄建刚. 一种结合 EWT 和成分分析的无线电指纹提取方法[J]. 计算机测量与控制,2019(4):128.
- [5] 刘彤,常江,汪仙山. GSM 系统中 $\pi/4$ DQPSK 调制方式的实现[J]. 计算机测量与控制,2001(1):55.
- [6] 沈嘉,徐霞艳,杜滢,等. LTE 同频组网关键问题分析[J]. 移动通信,2010(21):5.
- [7] 张世铭. LTE-M 系统在同站台平行换乘车站覆盖方案的应用研究[J]. 铁路通信信号工程技术,2019(12):51.
- [8] 肖清华,汪丁鼎,许光斌,等. TD-LTE 网络规划设计与优化[M]. 北京:人民邮电出版社,2013:271.

(收稿日期:2020-10-27)