

城市轨道交通车-地通信无线指纹库的构建及应用

吴 杰

(上海地铁维护保障有限公司通号分公司, 200235, 上海)

摘 要 [目的] 目前,城市轨道交通车-地通信无线环境检测主要采用人工携带仪表进行测试的方式,工作量大,效率低。为了满足车-地通信无线环境监测的智能化、常态化需求,有必要构建城市轨道交通车-地通信无线指纹库,实现对车-地通信无线环境的实时监测。[方法] 详细阐述了车-地通信无线指纹库的建立思路及流程。将地铁线路无线接收区域按照适当间隔划分成若干个网格。通过安装在地铁列车上无线监测设备,实时采集地铁线路在每个网格的车-地通信无线环境数据。利用不同编码方式,引入马氏距离,进行特征数据处理,提取每个网格的无线特征信息,并写入对应的网格区域,形成车-地通信无线指纹库;无线指纹库采用 DeepFS(傅里叶序列深度模型)算法,可实现每个网格的无线特征数据自适应更新。结合实例介绍了城市轨道交通车-地通信无线指纹库的应用情况。[结果及结论] 由实时监测数据和车-地通信无线指纹库中的无线指纹信息的对比,能及时发现车-地通信无线环境异常情况,从而有效提高城市轨道交通车-地通信无线环境的维护水平。

关键词 城市轨道交通; 车-地通信; 无线指纹库; 大数据; 无线特征数据

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.11.002

Establishment and Application of Wireless Fingerprint Library for Urban Rail Transit Vehicle-wayside Communication

WU Jie

(Telecom & Signal Branch, Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Currently, wireless environment detection for urban rail transit vehicle-wayside communication primarily relies on manual testing with instruments, which is labor-intensive and inefficient. To meet the needs for intelligent and routine monitoring of the vehicle-wayside wireless communication environment, it is necessary to construct a wireless fingerprint library for this issue to enable the real-time monitoring. [Method] The conceptualization and process of establishing the wireless fingerprint library for vehicle-wayside communication is elaborated. The wireless reception areas of metro lines are divided into numerous grids at appropriate inter-

vals. Wireless monitoring equipment installed on metro trains collects real-time data on the vehicle-wayside communication wireless environment for each grid. By employing various encoding methods and introducing Mahalanobis distance, the characteristic data are processed, the wireless feature information for each grid is extracted and then recorded into the corresponding grid area to form wireless fingerprint library. The library utilizes the DeepFS algorithm, enabling adaptive updates of the wireless feature data for each grid. The application of the wireless fingerprint library in urban rail transit vehicle-wayside communication is illustrated through specific examples. [Result & Conclusion] By comparing real-time monitoring data with the wireless fingerprint information in the library, abnormalities in the vehicle-wayside wireless communication environment can be promptly detected. This effectively enhances the maintenance level of urban rail transit vehicle-wayside wireless communication environment.

Key words urban rail transit; vehicle-wayside communication; wireless fingerprint library; big data; wireless feature data

城市轨道交通车-地无线通信是列车安全运行的重要保障,车-地无线通信信号覆盖异常或受到外部的无线干扰都会影响列车正常运行^[1]。

城市轨道交通车-地通信无线传输系统包含轨旁基站、天线、漏缆等多种设备。这些设备一旦运行状态异常或性能逐步劣化,就会引起车-地无线通信信号覆盖异常^[2-3]。城市轨道交通车-地无线通信采用 2.4 GHz/5.8 GHz 双频频段和 1.8 GHz 频段。其中:2.4 GHz/5.8 GHz 双频频段易受到 Wi-Fi、蓝牙或无人机等民用无线通信设备的影响;1.8 GHz 频段不仅可能遇到机场或石油等行业基站的同频干扰,还可能受到运营商 4G 或 5G 基站的邻频干扰。

目前,城市轨道交通车-地通信的无线环境维护主要采用人工携带测试仪表进行故障排查和定期巡检,维护工作量大,效率低。目前,车-地通信的无

线环境越来越复杂,传统的人工维护方式已经无法满足运维要求。为了满足城市轨道交通车-地通信无线环境监测的智能化、常态化需求,本文利用大数据技术与人工智能技术,构建城市轨道交通车-地通信无线指纹(以下简称“无线指纹”)库,实时监测线路沿线的无线环境,以便及时发现车-地通信无线环境的异常情况。

1 无线指纹库的建立

无线指纹指地铁线路不同位置的无线特征,包括但不限于 CBTC(基于通信的列车控制)无线特征、LTE-M(地铁长期演进)无线特征、外部 Wi-Fi 无线特征及车-地无线通信的性能特征等。对地铁线路无线接收区域划分网格后,如同人类指纹库中的每一个人都有自己独特的指纹特征信息,无线指纹库中的每个网格也都有自己独特的无线特征信息。

在车-地通信无线环境实时监测中,只要将实时采集的网格无线环境数据与指纹库对应的网格无线特征信息进行相似度对比分析,就能知道该网格处的无线环境是否正常。

无线指纹库的建立与应用思路如图 1 所示。建立无线指纹库的主要步骤为区域网格划分、网格数据采集、特征工程处理、生成无线指纹库及无线指纹库自适应更新。

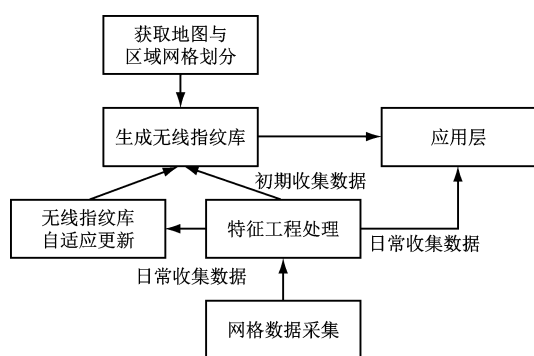


图 1 无线指纹库的建立与应用思路示意图

Fig. 1 Diagram of wireless fingerprint library establishment and application approach

1.1 区域网格划分

通过地铁线路各车站站台所在的经纬度及沿线里程标等信息,可计算各站间距及完整线路的总长。首先,综合考虑业务精度需求、监测设备性能及定位精度等因素,选择一个合适的固定尺寸;其次,确认无线监测设备天线可以接收的无线信号覆

盖范围半径为数百米。最后,按照固定尺寸,将地铁线路无线信号接收区域划分成若干个网格。固定尺寸可按需要调整。本研究所选用的固定尺寸为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 。

1.2 网格数据采集

将无线监测设备安装在地铁列车上,实时采集地铁线路沿线无线信号接收区域每个网格的车-地通信无线环境数据,包含 CBTC 信号数据、LTE-M 信号数据、外部 Wi-Fi 信号数据及车-地通信性能数据。

1.3 特征数据处理

对采集到的无线环境数据按网格分组进行特征数据处理,提取每个网格的无线特征信息。

特征数据中,AP(无线接入点)名称、MAC(媒体访问控制)地址和小区 ID 等数据为类别型数据。由于类别型数据是离散无序的,而且计算机程序无法识别判断类别型数据,故需要先通过编码将类别型数据转换成向量特征,从而使计算机能够识别类别型数据,进而输入深度学习框架模型进行学习训练。编码方式有 One-hot(独热)编码、频数编码及标签编码。应根据类别型数据的数据种类数量,确定合适的编码方式。

特征数据中,信噪比、信号强度及参考信号接收功率等数据为数字型数据,需要引入马氏距离 $D_M^{[4]}$,进行数据转换。 D_M 考虑了数据的分布特性,测量点(向量)与分布之间的距离。计算 D_M 时,要先考虑样本数据的平均值和协方差,进行量纲一化,从而减小数据特征方差不同对 D_M 的影响,从而使 D_M 更加符合数据分布特征及实际意义。有:

$$D_M = \sqrt{(x - \mu)S^{-1}(x - \mu)'} \quad (1)$$

式中:

- x ——数据原本数值;
- μ ——样本数据平均值;
- S ——样本数据协方差。

1.4 生成无线指纹库

无线指纹库采用列数据库构建,以线路的网格号码为主键,以网格的经纬度位置信息和提取的无线特征信息为列。

无线指纹信息包括但不限于:

- 1) 网格号码。
- 2) 网格的位置信息,包含经度和纬度。
- 3) CBTC 无线特征,包括 AP 名称(字段名为

“apname”)、MAC 地址(字段名为“mac”)、所有帧计数(字段名为“cnt”)、beacon 帧计数(字段名为“cnt-8”)、信噪比(字段名为“snr”)、信号强度(字段名为“rssi”)。

4) LTE-M 无线特征,包括频率(字段名为“freq”)、小区 ID(字段名为“cellid”)、信号强度(字段名为“rssi”)、参考信号接收功率(字段名为

“rsrp”)、载干比(字段名为“cir”)。

5) 外部 Wi-Fi 无线特征,包括服务集标志(字段名为“ssid”)、MAC 地址(字段名为“mac”)、频率(字段名为“freq”)、信号强度(字段名为“level”)。

6) 车-地通信性能特征,包含丢包率、延时率及通信网络传输流量速度。

无线指纹库样例如图 2 所示。

gridid	lng	lat	d d	data_list
1078	121.482185	31.240133	E2	[{"cnt": 6, "rsrp": -80.97, "cir": 2.94, "rssi": -48.39, "freq": 1802500000, "cellid": 237},...
1079	121.482380	31.240200	E1	[{"cnt": 3, "rsrp": -81.23, "cir": 4.1, "rssi": -49.01, "freq": 1802500000, "cellid": 237}]
1080	121.482575	31.240268	E2	[{"cnt": 3, "rsrp": -84.37, "cir": 2.98, "rssi": -51.79, "freq": 1802500000, "cellid": 237},...
1081	121.482769	31.240335	E2	[{"cnt": 4, "rsrp": -85.82, "cir": 1.8, "rssi": -52.76, "freq": 1802500000, "cellid": 237}, {...
1082	121.482964	31.240403	E2	[{"cnt": 6, "rsrp": -83.12, "cir": 4.46, "rssi": -50.96, "freq": 1802500000, "cellid": 237},...
1083	121.483159	31.240470	E2	[{"cnt": 3, "rsrp": -88.02, "cir": -1.55, "rssi": -53.33, "freq": 1802500000, "cellid": 237},...
1084	121.483354	31.240537	E2	[{"cnt": 3, "rsrp": -91.07, "cir": 0.54, "rssi": -57.5, "freq": 1802500000, "cellid": 237}, {...
1085	121.483548	31.240605	E2	[{"cnt": 2, "rsrp": -89.15, "cir": -1.94, "rssi": -54.26, "freq": 1802500000, "cellid": 237},...
1086	121.483743	31.240672	E1	[{"cnt": 3, "rsrp": -90.72, "cir": -1.98, "rssi": -55.81, "freq": 1802500000, "cellid": 237}]
1088	121.484155	31.240739	E1	[{"cnt": 3, "rsrp": -98.54, "cir": -1.27, "rssi": -64.0, "freq": 1792500000, "cellid": 37}]
1089	121.484362	31.240769	E1	[{"cnt": 1, "rsrp": -96.76, "cir": 0.04, "rssi": -62.98, "freq": 1792500000, "cellid": 37}]
1092	121.484983	31.240859	E1	[{"cnt": 1, "rsrp": -91.26, "cir": -1.92, "rssi": -56.39, "freq": 1802500000, "cellid": 237}]
1094	121.485397	31.240919	E1	[{"cnt": 1, "rsrp": -96.36, "cir": -1.06, "rssi": -61.99, "freq": 1802500000, "cellid": 237}]
1095	121.485604	31.240945	E2	[{"cnt": 1, "rsrp": -97.93, "cir": -2.96, "rssi": -62.4, "freq": 1802500000, "cellid": 237},...

图 2 无线指纹库样例截图

Fig. 2 Screenshot of samples of wireless fingerprint library

1.5 无线指纹库的自适应更新

地铁线路的无线环境受外部影响较大,无线信号具有变化快、波动大的特点。为了能够匹配不断变化的无线环境,无线指纹库采用 DeepFS(傅里叶序列深度模型)自适应算法^[5],通过深度学习海量监测数据,能识别最新地铁线路无线环境,进而自适应更新迭代无线指纹库中各网格的无线特征数据,以确保无线指纹信息为最新数据,满足业务需求。

2 无线指纹库的应用

无线指纹库能不断积累地铁无线环境的历史数据,还能获得整个线路的车-地通信大数据。通过将实时测量的无线环境数据和无线指纹信息进行对比分析,能及时发现车-地通信无线环境的异常情况,从而提升对车-地通信无线环境的维护水平。

无线指纹库中每个网格的无线指纹信息都可以采用雷达图进行可视化分析展示。某网格的无线指纹信息雷达图如图 3 所示。

通过无线指纹库的网格特征相似度分析,可判断网格实时监测数据和无线指纹信息的相似程度。余弦相似度 S_{\cos} 为常用的一种网格特征相似度。 S_{\cos}

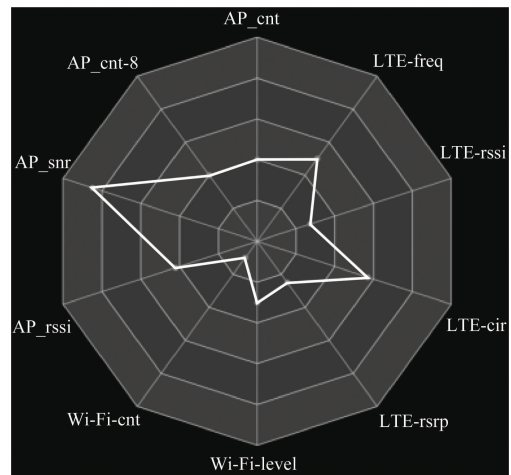


图 3 某网格的无线指纹信息雷达图

Fig. 3 Radar map of wireless fingerprint information for a certain grid

本质上为 2 个特征向量的内积,即 2 个向量的夹角或其中一个向量在另一个向量上的投影,故有:

$$S_{\cos} = \frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}}{\|\mathbf{A}\| \times \|\mathbf{B}\|} \quad (2)$$

式中:

\mathbf{A} ——网格无线指纹信息的特征向量;

\mathbf{B} ——网格实时监测数据的特征向量。

夹角越小或投影值越大, S_{\cos} 就越大,网格特征

相似度就越大,说明 2 个向量的相关度高。若 2 个向量夹角是 90° ,则 $S_{\cos}=0$,说明这 2 个向量线性不相关。

以某实际案例为例, $A=[6\ 3\ 7\ 9\ 5\ 4\ 3\ 7\ 9\ 3]$, $B=[3\ 7\ 3\ 5\ 10\ 8\ 8\ 3\ 6\ 7]$,根据式(2)计算可得, $S_{\cos}=0.790\ 8$ 。由此可见,该网格实时监测数据和无线指纹信息的特征相似程度较低,说明二者相关性不高,车-地通信无线环境异常。

网格实时监测数据和无线指纹信息的特征相似程度还可通过雷达对比图直观展示。某网格实时监测数据与无线指纹信息的雷达对比图如图 4 所示。

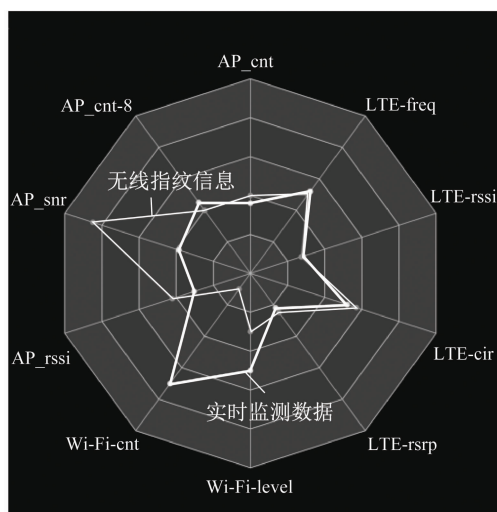


图 4 某网格的实时监测数据和无线指纹信息的雷达对比图

Fig.4 Radar comparison chart of real-time monitoring data and wireless fingerprint information for a certain grid

由图 4 可见,二者差异明显,据此可判断车-地通信无线环境异常。

3 结语

将地铁线路无线接收区域按照 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ 的固定尺寸,划分为若干个网格,在车-地通信正常情况下,将地铁沿线每个网格的地理位置信息和无线特征信息都记录在无线指纹库中。通过不断积累

地铁无线环境的历史无线特征数据,形成整个线路的车-地通信大数据库。这些信息包括但不限于 CBTC 无线特征信息、LTE-M 无线特征信息、外部 Wi-Fi 无线特征信息及车-地通信性能无线特征信息等。

通过对比分析实时监测数据和无线指纹信息,可以及时发现车-地通信无线环境异常情况,有效提高城市轨道交通车-地通信无线环境的维护水平。

参考文献

- [1] 朱莉. 城市轨道交通 CBTC 无线信号智能监测系统[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(增刊1): 117.
ZHU Li. Intelligent wireless signal monitoring of urban rail transit CBTC system[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(S1): 117.
- [2] 窦立星. 地铁 CBTC 系统干扰原因及干扰预测[J]. 信息技术与信息化, 2014(4): 222.
DOU Lixing. Interference causes and interference prediction of subway CBTC system[J]. Information Technology and Information, 2014(4): 222.
- [3] 杜成. 城市轨道交通 CBTC 系统 2.4 GHz 无线传输技术的应用研究[J]. 铁道标准设计, 2013, 57(3): 129.
DU Cheng. Application research on 2.4 GHz wireless transmission technology of CBTC system used in urban rail transit[J]. Railway Standard Design, 2013, 57(3): 129.
- [4] ETHERINGTON T R. Mahalanobis distances for ecological niche modelling and outlier detection: implications of sample size, error, and bias for selecting and parameterising a multivariate location and scatter method[J]. PeerJ, 2021, 9: e11436.
- [5] JIANG S, SYED T, ZHU X, et al. Bridging self-attention and time series decomposition for periodic forecasting[C]// Proceedings of the 31st ACM (Association for Computing Machinery) International Conference on Information & Knowledge Management. Atlanta: ACM, 2022: 3202.

· 收稿日期:2024-04-24 修回日期:2024-06-17 出版日期:2024-11-10

Received:2024-04-24 Revised:2024-06-17 Published:2024-11-10

· 通信作者:吴杰,高级工程师,24540033@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www. umt 1998. tongji. edu. cn