

基于增强积分双谱的轨道交通辐射源识别方法^{*}

刘海川¹ 张可欣² 惠 鏖² 文 璐^{1,3}

(1. 轨道交通工程信息化国家重点实验室, 710043, 西安; 2. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 710048, 西安;

3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安)

摘 要 [目的]城市轨道交通无线通信系统中存在大量外部干扰信号,对行车安全构成重大隐患。针对辐射源射频特征易受噪声与干扰影响,导致识别准确率低的问题,须提出一种基于增强对角积分双谱的通信辐射源个体识别方法,为轨道交通无线通信系统安全保障提供有效新途径。[方法]分析了对角相关局部积分双谱(DCLIB)的数据处理过程及原理,阐述了双谱变换的计算、增强对角积分双谱的计算、自适应双谱积分区间的划分,以及基于残差网络的辐射源识别方法。基于实际 Wi-Fi(无线保真)设备进行仿真试验,对 DCLIB 方法和其他辐射源识别方法的识别效果进行分析对比。[结果及结论]DCLIB 方法先估计通信辐射源信号的双谱,并利用次对角线各平行线的自相关特性形成新的谱信息以增强信号的细微特征;然后依据谱信号强度自适应选取合理的谱信号积分区间,在降低噪声影响的同时降低算法的计算复杂度,从而获得增强的对角积分双谱;进而将所提 DCLIB 信号作为辐射源的射频指纹特征,采用深度残差网络实现辐射源个体识别。基于实际 Wi-Fi 设备的仿真识别试验结果表明,DCLIB 方法的识别准确率最优,并具有良好的抗噪声性能。

关键词 城市轨道交通;辐射源识别;射频指纹;积分双谱
中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.004

Rail Transit Radiation Source Identification Method Based on Enhanced Diagonal Integral Bispectrum

LIU Haichuan¹, ZHANG Kexin², HUI Hui², WEN Lu^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization, 710043, Xi'an, China; 2. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, 710048, Xi'an, China; 3. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 710043, Xi'an, China)

Abstract [Objective] Numerous external interference sig-

nals exist in urban rail transit wireless communication system, posing a significant threat to operational safety. Targeting the issue of low identification accuracy due to the radiation source RF (radio frequency) characteristics susceptible to noise and interference, it is necessary to propose an individual identification method for communication radiation sources based on enhanced diagonal integral bispectrum. This method provides an effective new approach to ensuring the security of rail transit wireless communication systems. [Method] The data processing procedure and principles of DCLIB (diagonal-correlation local-integral bispectrum) are analyzed. The calculations for bispectrum transformation, enhanced diagonal integral bispectrum calculation, division of adaptive bispectrum integration interval, and radiation source identification method based on residual networks are explained. Simulation experiments are conducted using actual Wi-Fi (wireless fidelity) devices to analyze and compare the identification performance of the DCLIB method with that of other radiation source identification methods. [Result & Conclusion] The DCLIB method first estimates the bispectrum of communication radiation source signals and utilizes the autocorrelation characteristics of each parallel line on the sub-diagonals to form new spectral information for the enhancement of the signal subtle features. Subsequently, the method adaptively selects a reasonable spectral signal integration interval based on the spectral signal strength, reducing both noise impact and algorithm computational complexity. Thus, an enhanced diagonal integral bispectrum is obtained. The proposed DCLIB signal is then used as the RF fingerprint feature of the radiation source, and individual source identification is achieved using a deep residual network. Simulation identification experiments based on actual Wi-Fi devices demonstrate that the DCLIB method achieves the highest identification accuracy and exhibits excellent noise-resistance performance.

Key words urban rail transit; radiation source identification; radio frequency fingerprint; integral bispectrum

^{*} 国家自然科学基金青年基金项目(61903297);中铁第一勘察设计院科研项目(2021KY40ZD(CYH)-04);西安市科技计划项目高校院所科技人员服务企业项目(22GXFW0081)

无线通信技术的迅速发展为人类带来极大便利,而无线传播环境的开放性使得无线通信的安全问题日益严峻。在轨道交通系统中,列车的运行与控制、服务与管理,大量依赖无线通信,而系统中存在的外部干扰对行车安全构成重大隐患^[1]。辐射源个体识别技术通过分辨辐射源特有的射频指纹,可以从信号层面识别出非法无线用户,近年来受到广泛关注。

射频指纹是指通信辐射源固有缺陷对射频信号产生的特有影响,它难以被模仿或篡改,可用于对不同辐射源的识别^[2]。信号双谱^[3]能够在保留原始信号幅度、相位等信息的同时抑制高斯噪声,有利于对无线辐射源进行分类识别。然而双谱维数较高、数据量较大,会导致算法复杂度较高。对此,学者们提出了一系列积分双谱方法将二维双谱数据转化为一维以减少数据量^[4,6]。其中 AIB(轴向积分双谱)^[4]和 SIB(矩形积分双谱)^[5]由于计算简单、分类效果良好而得到广泛应用。此外, DIB(对角积分双谱)根据双谱的对称性沿平行于双谱主次对角线进行积分,避免了特征信息点的重复或缺失,且包含了更多的相位和幅度信息,有效提高了识别性能^[6]。上述研究均显示出积分双谱方法在通信辐射源个体识别领域的优势,然而在真实环境中往往缺乏鲁棒性:当接收端在噪声或干扰影响下信噪比较低时,算法识别率往往急剧下降,难以满足应用需求。

针对这一问题,本文提出了一种基于增强对角积分双谱的通信辐射源个体识别方法——DCLIB(对角相关局部积分双谱)方法。

1 DCLIB 方法的识别原理及设计

DCLIB 方法的识别过程如图 1 所示,主要包括对接收信号的预处理、特征提取和分类识别 3 个环节。在特征提取环节:首先,对辐射源信号进行双谱变换,并进行对角相关计算以提取次对角线各平行线的自相关特性,该操作可以突出信号的细微特征,增大信号与噪声或干扰之间的区别;之后,通过选取合适的积分区间获得对角相关局部积分,在进一步降低噪声对指纹特征影响的同时减少运算量;最后,将对角相关局部积分结果输入到残差网络中,进行辐射源识别。

1.1 双谱变换及分析

将通信辐射源发射的时域信号表示为 $x(n)$, $n =$

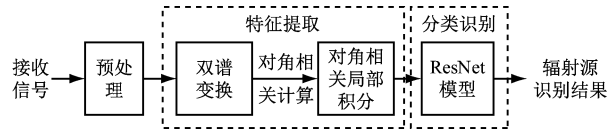


图 1 DCLIB 的识别过程

Fig. 1 Identification process of DCLIB

1, 2, ..., N, 则接收信号 $y(n)$ 通常可建模为^[3]:

$$y(n) = x(n) + v(n) \quad (1)$$

式中:

$v(n)$ ——高斯白噪声。

$y(n)$ 的双谱可表示为:

$$B_y(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} C_{3y}(\tau_1, \tau_2) e^{-j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)} \quad (2)$$

式中:

τ_1, τ_2 ——相关函数的自变量, 分别代表 2 个延时;

$C_{3y}(\tau_1, \tau_2)$ ——接收信号的三阶相关函数, 且

$$C_{3y}(\tau_1, \tau_2) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y(n)y(n+\tau_1)y(n+\tau_2);$$

j ——虚部;

ω_1 和 ω_2 ——双谱二维平面的 2 个轴变量。

将 $y(n)$ 分成 K 段, 每段有 M 个数据, 对每段数据的均值进行量纲一化处理, 并依次求其三阶累积量的估计。当双谱两个方向上的延迟点数分别为 p 和 q 时, 有:

$$\begin{aligned} \hat{C}_{3y,k}(p, q) &= \frac{1}{M} \sum_{n=-M_1}^{M_2} [x_k(n) + v_k(n)] \cdot \\ &\quad [x_k(n+p) + v_k(n+p)] \cdot \\ &\quad [x_k(n+q) + v_k(n+q)] \end{aligned} \quad (3)$$

$$k = 1, 2, \dots, K$$

式中:

$\hat{C}_{3y,k}(p, q)$ ——第 k 段接收信号的三阶相关函数估计值;

$x_k(n), v_k(n)$ —— $x(n)$ 中第 k 段发射信号及高斯白噪声;

$x_k(n+p), x_k(n+q)$ ——延迟点数分别为 p, q 时的第 k 段发射信号;

$v_k(n+p), v_k(n+q)$ ——延迟点数分别为 p, q 时的第 k 段高斯白噪声。

其中, 分段参数 $M_1 = \max(0, -p, -q)$, 参数 $M_2 = \min(M-1, M-1-p, M-1-q)$ 。

由于信号和高斯白噪声的均值都为 0, 式(3)整

理化简后可得:

$$\hat{C}_{3y,k}(p,q) = \hat{C}_{3x,k}(p,q) + \hat{C}_{3v,k}(p,q) \quad (4)$$

式中:

$\hat{C}_{3x,k}, \hat{C}_{3v,k}$ ——第 k 段发射信号、高斯白噪声数据的三阶相关函数估计值。

由于信号双谱为其三阶累积量的二维离散傅里叶变换,所以接收信号 $y(n)$ 的双谱估计值 $\hat{B}_y(\omega_1, \omega_2)$ 为:

$$\hat{B}_y(\omega_1, \omega_2) = \sum_{p=-L}^L \sum_{q=-L}^L [\hat{C}_{3y}(p,q) \cdot W_N(p,q) e^{-j(\omega_1 p + \omega_2 q)}] \quad (5)$$

其中, $\hat{C}_{3y}(p,q) = \hat{C}_{3x}(p,q) + \hat{C}_{3v}(p,q)$, $\hat{C}_{3x}(p,q) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \hat{C}_{3x,k}(p,q)$, $\hat{C}_{3v,k}(p,q) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \hat{C}_{3v,k}(p,q)$, $L < M - 1$, $W_N(p,q)$ 为二维窗函数。

由式(4)可以看出,由于实际信号为有限长信号,三阶累积量计算无法完全去除噪声对信号的影响。因此,式(5)最终得到的双谱估计值不仅包含了信号分量,也包含了噪声分量。

图 2 为高斯白噪声和有噪信号的双谱估计结果。由图 2 可以看出,由于高阶谱对具有高斯性的信号存在盲性,所以高斯白噪声双谱的幅值较低而信号双谱的幅值较高,两者存在显著差异。且由于

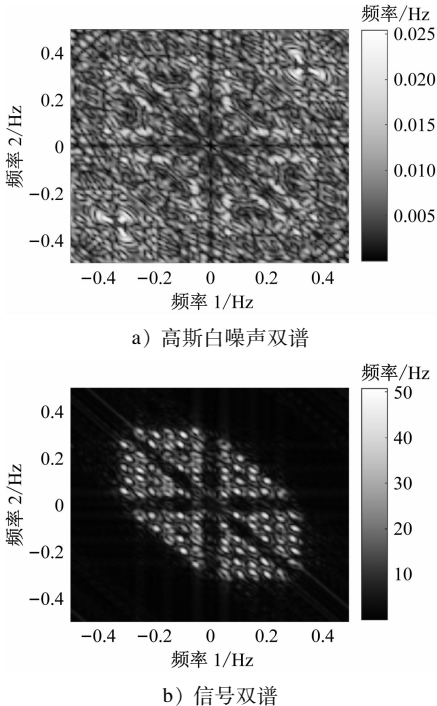


图 2 高斯白噪声和信号双谱估计结果

Fig. 2 Bispectrum estimation results of gaussian white noise and the signal

信号与信号之间具有较强的耦合性,使得信号双谱的能量主要集中在双频域中心附近。

1.2 增强对角积分双谱方法

图 3 为量纲一化处理后的的高斯白噪声和有噪信号 DIB。本文选用次对角线路径。与之前的结论类似,图 3 中有噪信号的对角积分双谱值远高于白噪声的对角积分双谱值,且幅值较大的点主要集中在频域中心位置附近。相较于接收信号所传递的信息,辐射源的特征可视为隐藏于其中的极其微弱信号,而多重相关方法是提取微弱信号的有效手段,由此提出 DCIB (对角相关积分双谱) 方法以增强信号辐射源特征。

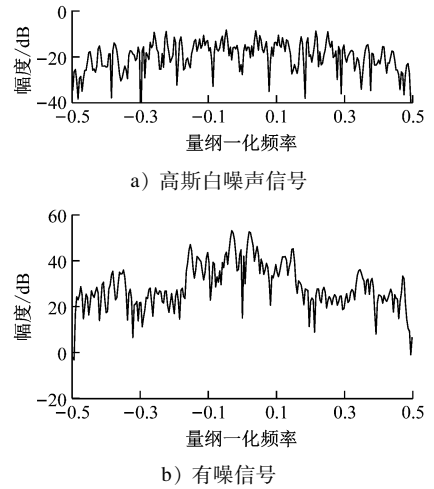


图 3 量纲一化处理后的的高斯白噪声和有噪信号 DIB

Fig. 3 DIB of Gaussian white noise and the noised signal after dimensional normalization

DCIB 方法在积分之前通过自相关运算来增强微弱信号的细微特征。其具体过程是对平行于次对角线路径上的每条线段做自相关积分运算,即:

$$D_{\text{CIB}}(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi-\theta} |\hat{B}_y(\omega_1, \theta - \omega_1)| \cdot \hat{B}_y(-\omega_1, -\theta - \omega_1) | d\omega_1 \\ \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi+\theta}^{\pi} |\hat{B}_y(\omega_1, \theta - \omega_1)| \cdot \hat{B}_y(-\omega_1, -\theta - \omega_1) | d\omega_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中:

θ ——旋转角度, $0 \leq \theta \leq 2\pi$ 。

图 4 为量纲一化处理后的信号 DCIB。与图 3 b) 相比,DCIB 信号中心和边缘部分的差异显著增加,突出了信号的细微特征且降低了与信号不相关的噪声部分的影响。因此以 DCIB 信号作为辐射源

的射频指纹有利于提高其抗干扰能力。

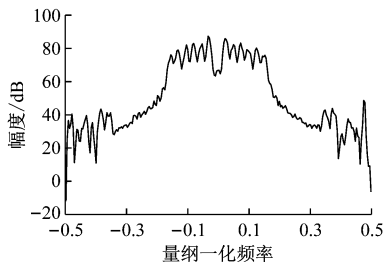


图4 量纲一化处理后的信号 DCIB

Fig. 4 DCIB of the signal after dimensional normalization

1.3 自适应双谱积分区间

鉴于 DCI 所反映的信号特征主要集中于幅度较高的部分,而噪声的影响主要集中于幅度较低的部分,为进一步突出信号特征,去除噪声影响,降低计算复杂度,本文只选取 DCIB 值较高的区域做积分处理,称为 DCLIB(对角相关局部积分双谱)。这样虽然可能损失少量的信号特性,但去除了噪声对指纹特征的大部分影响,有利于后续识别。

设选取门限值为 T ,则

$$T = \alpha \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d_{\text{diag}}(i) \quad (7)$$

式中:

α ——比例因子, $0 < \alpha < 1$;

m ——对角序列个数;

$d_{\text{diag}}(i)$ ——第 i 条对角序列的自相关值。

将 T 设为信号对角序列自相关值均值的 α 倍,小于该门限的值将不参与积分, α 的大小可根据具体信号进行调节使其更符合所要求。

1.4 基于残差网络的辐射源识别

DCLIB 信号为增强积分双谱信号,能够突出信号的细微特征并抑制噪声,可作为有效的通信辐射源射频指纹。本文据此设计用于辐射源指纹识别的深度神经网络。

不同通信源射频指纹的差异较为细微,通常需要多层神经网络加以提取。对此,本文采用残差网络进行辐射源识别,以克服传统卷积神经网络存在的梯度消失问题。DCLIB 通过积分有效降低了数据维度,减少了神经网络宽度,为设计深度网络提供了空间。由此,本文在设计网络参数时,使用了一个适用于 DCLIB 辐射源识别的 10 层残差网络模型。相较于一般残差网络模型(如文献[7]的 Res-Net152 模型),该模型在降低模型容量的同时还能确保较高的识别准确率。本文的残差网络主要包

含 1 个输入卷积层,4 个残差块,1 个全局平均池化层及 1 个输出连接层。残差网络结构如图 5 所示,在试验中初始学习率设为 0.001,损失函数为交叉熵函数,使用 SGDM 优化器,批数量为 64,轮次为 50。

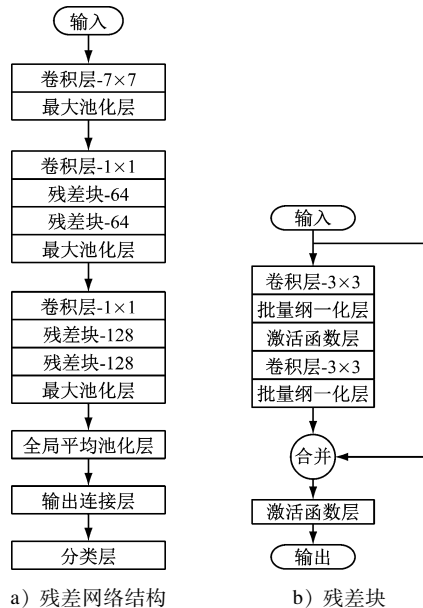


图5 用于通信辐射源个体识别的残差网络结构

Fig. 5 Residual network structure for communication radiation source individual identification

2 试验分析

2.1 试验设置

为客观评估 DCLIB 方法的可行性和有效性,本文使用来自 WiSig 公开数据集^[8]实际场景中的 10 台不同 WiFi 发射设备前导码进行分类识别试验。不失一般性,每台设备 200 帧。残差网络的训练、验证和测试数据集按 7:2:1 的比例随机划分。使用 Matlab2020b 软件和 Intel 酷睿 i7-6700 CPU(中央处理器)提取辐射源的射频指纹并进行训练和测试。

由于实际接收信号的信噪比不小于 10 dB,为验证 DCLIB 方法在低信噪比下的性能,故需对数据集进行人工加噪处理。对实际接收信号 $y(n)$ 添加方差为 σ_a^2 的加性高斯白噪声 $a(n)$,得到加噪后的接收信号 $y^*(n)$:

$$y^*(n) = \frac{y(n) + a(n)}{\sqrt{1 + \sigma_a^2}} \quad (8)$$

DCLIB 方法试验部分所给信噪比 r_a 均为实际接收信号与所添加人工噪声的功率之比,因此加噪

后信号的信噪比 $r < r_a$ 。经上述处理后,接收信号 $y^*(n)$ 除了添加 $a(n)$ 之外,还包含原真实环境中的干扰和噪声。

2.2 试验结果

为了验证 DCLIB 方法的识别效果,分别采用 DCLIB 方法、DCIB 方法、轴向积分双谱方法、矩形积分双谱方法及 DIB 方法,在不同 r_a 条件下进行试验,得到的识别准确率见图 6。在 DCLIB 方法识别中,设定 $\alpha = 0.6$ 。

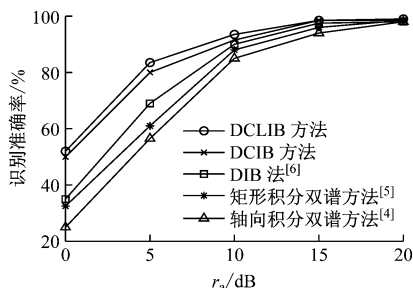


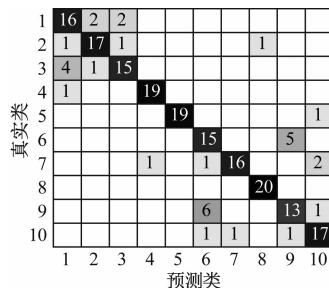
图 6 不同方法的识别准确率

Fig. 6 Identification accuracy rates of different methods

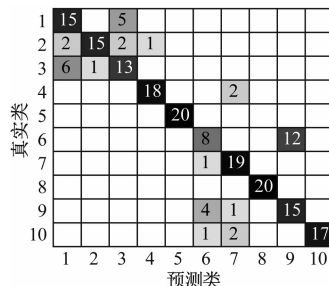
由图 6 可见,在 $r_a = 20$ dB 时,各方法的识别准确率相近,均能达到 95% 以上。这与采用同样数据集的文献[7]结果相吻合。而在 $r_a < 15$ dB 时,所有方法的识别准确率均随着 r_a 的降低而下降。经分析,真实环境中的干扰和噪声对所提取的射频指纹产生了影响,导致识别性能降低。而在强干扰环境下 DCLIB 方法的性能具有显著优势。图 6 结果表明,当 $r_a \leq 10$ dB 时,DCLIB 方法和 DCIB 方法的识别准确率明显高于其他方法的识别准确率。例如,当 $r_a = 5$ dB 时,DIB 方法的识别率已降至 69.0% 左右,而 DCLIB 方法和 DCIB 方法的识别率仍能达到 83.5% 和 80.0%,说明二者抗噪性明显优于其他 3 种方法。

为进一步分析所提算法提高识别准确率的原因,绘制在 $r_a = 5$ dB 时 DCLIB 方法、DCIB 方法和 DIB 方法的分类混淆矩阵,如图 7 所示。

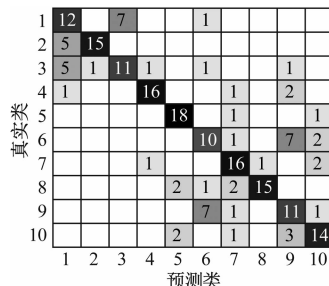
由图 7 可以看出:DIB 方法对不同设备之间的误识别率较高,尤其是第 1、2、3、6、9 类设备;DCIB 方法对设备的误识别率明显较小,说明通过增强信号的细微特征可以更好地保留辐射源本身的指纹特征;与 DCIB 算法相比,DCLIB 算法的设备误识别率进一步降低。由此可见,DCLIB 算法虽然损失了少量信号特性,但去除了噪声对指纹特征的影响,从而提高了识别准确率。



a) DCLIB 方法



b) DCIB 方法



c) DIB 方法

注:第 1 行第 2 列数字表示真实类为 1 类、被预测为 2 类的样本数;余类同。

图 7 在 $r_a = 5$ dB 时 3 种方法的分类混淆矩阵

Fig. 7 Confusion matrix for 3 methods categorization when $r_a = 5$ dB

3 结语

针对通信辐射源射频特征易受噪声与干扰影响导致识别准确率低的问题,本文提出了一种基于增强对角积分双谱的辐射源个体识别方法——DCLIB 方法。DCLIB 方法通过对信号双谱上次对角线各平行线做自相关计算,增强了信号与噪声之间区别,突出了信号的细微特征。又通过自适应设置门限值选择合适的积分区间对处理后的信号进行局部积分,在保留信号有用特征的同时减少了运算数据量。

经试验验证,在噪声和干扰较强的场景下,本文方法的识别效果明显优于现有其他积分双谱算法,说明 DCLIB 方法在复杂通信环境下有着良好的适用性。

(下转第 49 页)

- 25(9): 276.
- [2] 冯明兵. 以城市文化为视角论地铁文化的价值[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(10): 21.
FENG Mingbing. On the value of metro culture from the perspective of urban culture [J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(10): 21.
- [3] 崔冬晖. 当代中国轨道交通空间设计方法新趋势的研究: 公共文化服务系统视野下的城市轨道交通公共空间文化规划与设计实践[D]. 北京: 中央美术学院, 2019.
CUI Donghui. Research on the new trend of contemporary Chinese rail transit space design method: cultural planning and design practice of urban rail transit public space from the perspective of public cultural service system [D]. Beijing: Central Academy of Fine Arts, 2019.
- [4] 张丙昌. 探究地下车站建筑设计理念与创新: 以宁波地铁为例[J]. 北方建筑, 2019, 4(3): 28.
ZHANG Bingchang. Exploring the architectural design idea and innovation of underground station: take Ningbo Metro as an example [J]. Northern Architecture, 2019, 4(3): 28.
- [5] 李罡, 李虎. 泉城地理与地铁工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
LI Gang, LI Hu. Spring city geography and metro project [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.
- [6] 杨丽芝, 曲万龙, 刘春华, 等. 济南城市工程地质条件分区及轨道交通建设适宜性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(6): 120.
YANG Lizhi, QU Wanlong, LIU Chunhua, et al. Analysis of suitability about the division of engineering geological condition and rail transit construction in Jinan urban area [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(6): 120.
- [7] 杨希东. 济南中心城区城市快速路网布局优化研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2018.
YANG Xidong. Study on layout optimization of urban expressway network in central district of Jinan [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2018.
- [8] 李虎, 李罡, 武朝军. 济南泉域地区轨道交通建设与泉水保护[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2019, 1(2): 128.
LI Hu, LI Gang, WU Chaojun. Rail transit construction and spring water protection in Jinan spring area [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2019, 1(2): 128.
- 收稿日期:2021-07-01 修回日期:2022-11-08 出版日期:2024-01-10
Received:2021-07-01 Revised:2022-11-08 Published:2024-01-10
• 第一作者:路林海, 正高级工程师, jinanguidao123@126.com
通信作者:孙捷城, 高级工程师, jngdjtmetro@126.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

(上接第 21 页)

参考文献

- [1] 佚名. 不明信号逼停深圳地铁[J]. 都市快轨交通, 2012, 25(6): 116.
Anon. Unknown signal forced Shenzhen Subway to stop [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2012, 25(6): 116.
- [2] 俞佳宝, 胡爱群, 朱长明, 等. 无线通信设备的射频指纹提取与识别方法[J]. 密码学报, 2016, 3(5): 433.
YU Jiabao, HU Aiqun, ZHU Changming, et al. RF fingerprinting extraction and identification of wireless communication devices [J]. Journal of Cryptologic Research, 2016, 3(5): 433.
- [3] 陈涛, 姚文杨, 翟孝霁, 等. 雷达辐射源信号双谱估计的物理意义及其辐射源个体识别[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(1): 179.
CHEN Tao, YAO Wenyang, ZHAI Xiaofei, et al. Bispectrum physical meaning and emitter individual recognition of radar emitter signal [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(1): 179.
- [4] 葛听雨, 应雨龙, 王申华, 等. 基于轴向积分双谱与灰色关联分类器的通信辐射源识别[J]. 上海电力大学学报, 2022, 38(1): 82.
GE Tingyu, YING Yulong, WANG Shenhua, et al. Individual identification of communication emitter based on axially integrated bispectra and gray relation classification [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2022, 38(1): 82.
- [5] YAO Y, YU L, CHEN Y. Specific emitter identification based on square integral bispectrum features [C] // 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT). Nanjing: IEEE, 2020: 1311.
- [6] 孟祥豪, 赵海旭, 梁言. 一种基于对角积分双谱的复合调制 LPI 雷达信号识别方法 [J]. 航天电子对抗, 2021, 37(5): 13.
MENG Xianghao, ZHAO Haixu, LIANG Yan. A compound modulated LPI radar signal recognition method based on diagonal integral bispectrum [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2021, 37(5): 13.
- [7] 张宁. 基于残差神经网络的辐射源个体识别[J]. 航天电子对抗, 2020, 36(4): 5.
ZHANG Ning. Emitter individual identification based on residual neural network [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2020, 36(4): 5.
- [8] HANNA S, KARUNARATNE S, CABRIC D. WiSig: a large-scale WiFi signal dataset for receiver and channel agnostic RF fingerprinting [J]. IEEE Access, 2022, 10: 22808.
- 收稿日期:2023-03-30 修回日期:2023-05-06 出版日期:2024-01-10
Received:2023-03-30 Revised:2023-05-06 Published:2024-01-10
• 第一作者:刘海川, 高级工程师, liuhaichuan@tymetro.ltd
通信作者:惠懿, 副教授, huihui@xaut.edu.cn
• ©《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