

# 超声导波轨底裂纹检测的信号增强技术

何继平<sup>1</sup> 周永久<sup>1</sup> 钦 佩<sup>1</sup> 张 岩<sup>1</sup> 周守镇<sup>1</sup>  
王 平<sup>2</sup> 周文涛<sup>2</sup> 刘 勇<sup>3</sup>

(1. 苏州市轨道交通集团有限公司, 215100, 苏州; 2. 南京航空航天大学自动化学院, 210016, 南京;  
3. 南京派光高速载运智慧感知研究院有限公司, 210016, 南京)

**摘 要** [目的] 导波在钢轨中的传播过程中存在抗干扰能力差和信号衰减严重问题, 不利于识别轨底裂纹。为提高信噪比, 有必要提出一种信号增强技术用于增强导波信号。[方法] 在传统超声导波检测基础上, 利用 Barker 码作为伪随机序列码, 采用 BPSK(二进制相位编码) 技术将原始激励信号经过编码调制后得到新的激励信号, 实现对激励信号的扩频处理, 并对采集的接收信号进行解扩。搭建超声导波轨底裂纹检测试验平台, 分别对不同尺寸的钢轨轨底人工裂纹进行对比试验, 分别在激励信号扩频与非扩频情况下, 计算所接收导波信号的衰减系数。[结果及结论] 试验结果表明, 导波信号使用信号增强技术之后, 相较于未经处理的原始导波信号, 在传播相同距离时, 衰减系数得到了明显降低, 超声导波信号将能传播更远距离; 相同尺寸人工裂纹所产生的影响更加明显, 超声导波对钢轨轨底裂纹的检测灵敏度得到了明显提升。

**关键词** 轨道交通; 钢轨裂纹检测; Barker 码; 超声导波; 信号增强技术

**中图分类号** U213.4<sup>+</sup>3

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2025.04.047

## Signal Enhancement Technology Based on Ultrasonic Guided Wave Rail Bottom Crack Detection

HE Jiping<sup>1</sup>, ZHOU Yongjiu<sup>1</sup>, QIN Pei<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, ZHOU Shouzhen<sup>1</sup>, WANG Ping<sup>2</sup>, ZHOU Wentao<sup>2</sup>, LIU Yong<sup>3</sup>

(1. Suzhou Rail Transit Group Co., Ltd., 215100, Suzhou, China; 2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 210016, Nanjing, China; 3. Nanjing Paiguang High Speed Transport Intelligent Perception Research Institute Co., Ltd., 210016, Nanjing, China)

**Abstract** [Objective] During the propagation of guided waves in rails, there are problems of poor anti-interference ability and severe signal attenuation, which hinder the identification of rail bottom cracks. To improve the signal-to-noise ratio, it is necessary to propose a signal enhancement technology

to strengthen the guided wave signal. [Method] Based on the traditional ultrasonic guided wave detection, Barker code is used as the pseudo-random sequence code, and BPSK (binary phase shift keying) technology is adopted to obtain a new excitation signal after coding and modulating the original excitation signal, achieving the spread spectrum processing of the excitation signal, to despread the collected received signal. An ultrasonic guided wave rail bottom crack detection test platform is built, and comparative tests are conducted on artificial cracks of different sizes at the rail bottom. The attenuation coefficients of the received guided wave signals are calculated respectively under spread spectrum and non-spread spectrum conditions of the excitation signal. [Result & Conclusion] The experiments prove that after the guided wave signal is processed by the signal enhancement technology, the attenuation coefficient is significantly reduced when propagating the same distance compared with the original unprocessed guided wave signal, and the ultrasonic guided wave signal is able to travel a longer distance. The effect is more obvious for artificial cracks of the same size, and the detection sensitivity of ultrasonic guided waves for rail bottom cracks is significantly improved.

**Key words** rail transit; rail crack detection; Barker code; ultrasonic guided wave; signal enhancement technology

现阶段, 铁路运输在我国国民经济体系中依然占据着极其重要的地位<sup>[1-2]</sup>, 有必要在线无损检测钢轨以监控钢轨质量。

文献[3]基于经典的轨旁超声波检测系统, 进一步提出了一种基于 SVD(奇异值分解)和独立分量分析的钢轨超声导波信号处理方法, 用于钢轨头部横向缺陷的远程检测和定位。文献[4]开发了一种在线缺陷检测系统, 可以检测到道岔钢轨底部 5% 横截面积损失的缺陷; 文献[5]研究了基于时频分析的主动导波模态特征提取和道岔剥落损伤定位方法, 实现了轻度剥落损伤的导波模态特征提取和损伤定位。

在实际应用中,用于检测超声导波钢轨裂纹的导波信号会受到各种噪声干扰,信噪比被降低,不利于识别钢轨裂纹,故有必要增强钢轨中的导波信号<sup>[6]</sup>。

扩频技术具有抗干扰特性,早期被广泛应用于雷达领域。文献[7]分析 DSSS(直接序列扩频)系统抗干扰机理,对雷达通信抗干扰性能进行分析推导,为 DSSS 的理论分析奠定了基础。文献[8]对于超声扩频应用中的能量效率和回声序列相关度两个指标给出了定义,并且对比讨论了 BPSK(二进制相位编码序列)、BFSK(二进制频率编码序列)和 BASK(二进制振幅编码序列)等 3 种调制方法参数配置。文献[9]将扩频技术应用到声波定位领域,用于解决室外机械位置定位,可减小风速和机器噪声带来的干扰影响,证明扩频技术能够保证信号可靠传输。

根据通信原理中脉冲压缩方法,首先,采用多码元编码激励信号来替换单个脉冲信号或短脉冲信号,不需要提高激励电压,仅需增加信号激励时间,即可提高平均激励功率;然后,通过相应的解码方式令激励信号能量重新压缩恢复为一个短脉冲信号,不仅不会影响信号对裂纹识别的分辨率,而且可以很好地提高信噪比<sup>[10]</sup>。

本文将 BPSK 技术应用于超声导波对轨底裂纹的检测工作中,并利用扩频技术抗干扰能力提高超声导波信号传播距离,从而提高超声导波对钢轨轨底裂纹的检测灵敏度。

## 1 超声导波的信号增强技术

### 1.1 轨底裂纹超声导波检测平台

本文选用基于压电效应制作的超声波换能器作为超声导波的激励与接收装置。整体的超声导波检测系统由超声波换能器、信号发生器、功率放大器、示波器及待检测钢轨组成。

超声导波换能器使用压电陶瓷来产生并接收超声导波。待检测钢轨长度为 1 100 mm。在钢轨上,在轨底处距离钢轨端面 300 mm、600 mm、900 mm 的位置,分别制造 1 个以钢轨  $x$  轴方向为长、钢轨  $z$  轴方向为宽、钢轨  $y$  轴方向为深的人工裂纹,受裂纹制造条件的限制,裂纹深度分别为 3 mm、6 mm、9 mm,裂纹宽度均为 0.5 mm,裂纹长度均为 150 mm。

观察经过钢轨传播的直达波形状态,若导波信号经过裂纹,则信号能量会发生明显衰减,波形模

态发生变化,接收端可观察到信号波形幅值减小,信号波形发生畸变。

采用一发两收的方法,使用 3 个 200 kHz 超声导波换能器  $R_{pd}$ 、 $E$  及  $R_{pnd}$ ,其中  $E$  为激励探头, $R_{pd}$  与  $R_{pnd}$  为接收探头。

将 3 个换能器等间距安装在待检测的钢轨人工裂纹附近,将钢轨分为长度相等的两段检测区域,即  $R_{pd}$  和  $E$  的间距等于  $R_{pnd}$  和  $E$  的间距(以下简称“RE 间距”),且  $R_{pd}$  和  $E$  之间存在人工裂纹, $R_{pnd}$  和  $E$  之间不存在裂纹。探头与裂纹相对位置如图 1 所示。

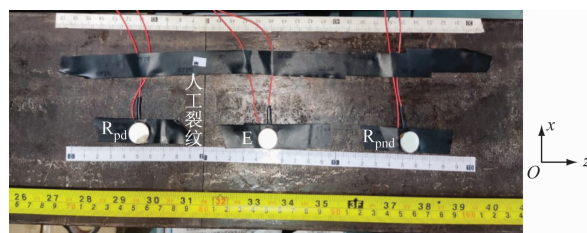


图1 探头与裂纹相对位置

Fig. 1 Relative position of the probe and the crack

### 1.2 伪随机序列码选择

Barker 码是一种非周期伪随机序列,是 BPSK 的一种,拥有良好的自相关特性。

对于 1 个  $N$  位 Barker 码  $[b_0, b_1, \dots, b_{N-1}]$ ,码元  $b_i (i=0, 1, 2, \dots, N-1)$  取值为 1 或 -1;当  $b_i$  取 1 时,得到的波形与原波形相位相同;当  $b_i$  取 -1 时,得到的波形与原波形相反;原波形经过  $b_i$  不同取值后的波形相位相差为  $\pi$ 。对于一个  $N$  位 Barker 码  $B[N]$ ,其编码序列可表示为:

$$B[N] = [b_0, b_1, \dots, b_{N-1}], b_i \in \{-1, 1\} \quad (1)$$

扩频技术中于扩展频谱的伪随机序列又称为扩频码,本文采用若干个 Barker 码组成伪随机二进制扩频码  $c(t)$ ,其中  $t$  为时间。对于编码后的解码过程又称为脉冲压缩。由脉冲压缩原理可知,脉冲压缩结果实际为时宽-带宽的乘积,即等效为信号压缩后的信噪比增益<sup>[7]</sup>。编码后信号的信噪比增益与编码码长  $N$  相关,Barker 码处理后的信噪比增益  $A_{SNR}$  为:

$$A_{SNR} = 10 \lg N, N \in \{2, 3, 4, 5, 7, 11, 13\} \quad (2)$$

根据式(2),为了获得最大的  $A_{SNR}$ ,应选择 13 位码元的 Barker 码,即  $N=13$ 。

### 1.3 信号扩频与解扩

使用 DSSS 技术,把信息码  $a_n$  与伪随机二进制

扩频码  $c(t)$  相乘得到复合码序列  $d(t)$ 。将复合码序列  $d(t)$  与一个正弦载波信号进行调制得到发射信号  $s(t)$ , 利用伪随机码拥有更高速率的特点, 达到展宽频谱的效果。此时的发射信号  $s(t)$  为已经扩频后信号, 其带宽由伪随机二进制扩频码  $c(t)$  的码速率决定, 而几乎与  $a_n$  的码速率无关<sup>[11]</sup>。在理想情况下,  $a_n$  经过调制得到  $s(t)$  的表达式为:

$$s(t) = d(t) \cos(2\pi f_c t) = A a_n c(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (3)$$

式中:

$A$ ——振幅;

$f_c$ ——载波的中心频率。

接收端接收到信号后, 将接收信号与本地参考扩频码进行相关计算, 并经过软件滤波, 即可还原得到  $a_n$ 。本文中, 信码为“1”, 伪随机扩频码选用 13 位 Barker 码, 信码和伪随机码相乘后得到复合码, 此时其频率扩大为原频率的 13 倍, 由于信码为“1”, 所以复合码和扩频码相同。再将扩频后得到的序列作为调制编码, 与频率为 200 kHz 的载波信号  $\sin t$  进行调制, 可以得到经过扩频序列调制的载波信号  $s(t)$ , 即作为激励信号。

使用 MATLAB 软件完成扩频和解扩过程的计算。原始信号为 HWS (汉宁窗信号) 波, 在 MATLAB 中使用 DSSS 技术对 HWS 波进行扩频, 得到新的信号, 称为 DSS (直接序列信号) 波; 接收信号

$r(t)$  与本地参考扩频码进行相关计算, 根据相关性还原出峰值, 并根据峰值的幅值信息对轨底裂纹进行判断。

## 2 轨底裂纹检测效果的试验验证

分别使用普通 HWS 与 DSS 作为激励信号, 在轨底裂纹检测平台上对 3 种深度的钢轨轨底裂纹分别作 3 种不同 RE 间距的试验。

DSS 接收信号解扩处理后的波形如图 2 所示。在不同 RE 间距条件下, 统计导波正常传播的直达波幅值  $V_{pnd}$  与经过裂纹传播情况下的直达波幅值  $V_{pd}$ 。一般认为  $V_{pd}$  相较于  $V_{pnd}$  所减少的幅值, 即是该条件下的裂纹所造成的衰减, 并用衰减系数  $\alpha_{pd}$  描述, 即  $\alpha_{pd} = 20 \lg(V_{pnd}/V_{pd})$ 。类似的, 采集导波正常传播距离  $L$  分别取 100 mm 与 150 mm 时的直达波峰值, 认为  $L = 150$  mm 时相较于  $L = 100$  mm 时直达波幅值所减少的幅值, 是导波正常传播距离为 50 mm 时的衰减, 并用距离衰减系数  $\alpha_L$  描述, 定义为测试所用最大 RE 间距下的  $V_{pnd}$  幅值  $V_{pnd, RE_{max}}$  与测试所用最小 RE 间距下的  $V_{pnd}$  幅值  $V_{pnd, RE_{min}}$  的比值, 即  $\alpha_L = 20 \lg \frac{V_{pnd, RE_{max}}}{V_{pnd, RE_{min}}}$ 。在裂纹深度分别为 3 mm、6 mm 及 9 mm 的情况下, 经过多次重复试验得到以下试验结果:

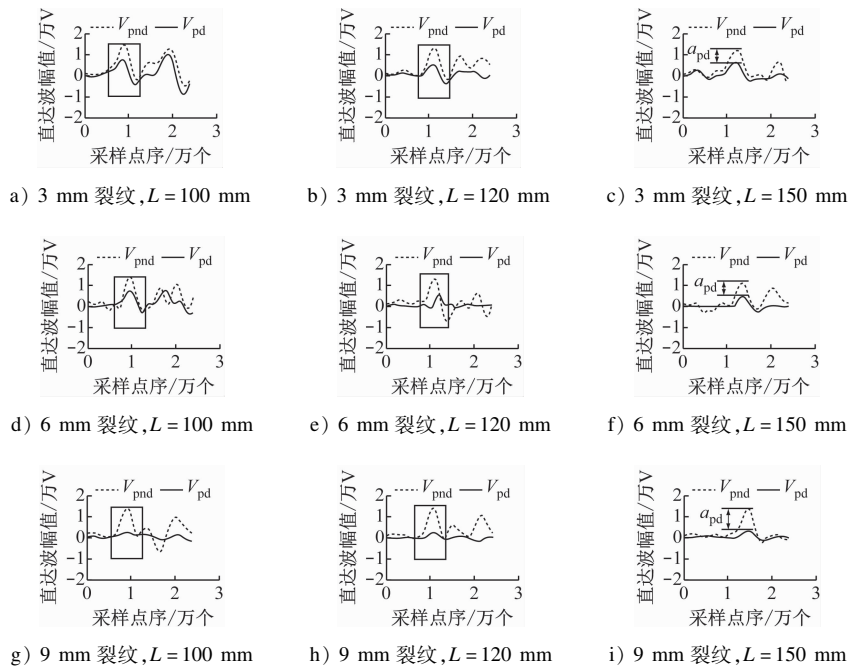


图2 DSS 接收信号解扩处理后的波形

Fig. 2 Waveform after despreading processing of DSS received signal



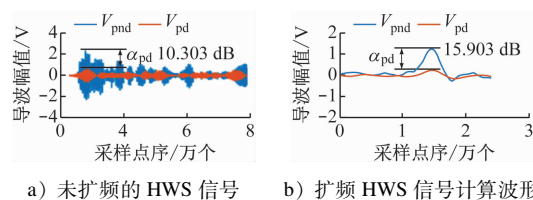
1) HWS 激励时,  $\alpha_{pd}$  分别为 4.774 dB、7.819 dB 及 11.058 dB。  $L = 50$  mm 的情况下,  $\alpha_L = 4.007$  dB。

2) DSS 激励时,  $\alpha_{pd}$  均值分别为 6.439 dB、7.189 dB、14.905 dB,  $L = 50$  mm 的情况下,  $\alpha_L = 1.702$  dB。

由图 2 可知,在深度为 3 mm 和 6 mm 的钢轨轨底裂纹下,与  $V_{pd}$  相比,  $V_{pnd}$  在时域中的信号幅值略有所衰减,但相差不大。根据理论分析,保证所检测裂纹深度要大于检测波形所用频率波长的一半,所以该试验中所用频率的导波信号对于小于 7 mm 深度的钢轨轨底裂纹并不敏感;与裂纹深度为 3 mm 和 6 mm 相比,裂纹深度为 9 mm 的  $V_{pnd}$  信号幅值衰减要比  $V_{pd}$  信号幅值衰减更明显,故使用 DSS 能更稳定地检测钢轨轨底裂纹。随着 RE 间距逐渐增大,  $V_{pnd}$  信号幅值也会发生衰减,且信号强度呈递减趋势。

在同等裂纹尺度下, DSS 激励的导波信号  $\alpha_{pd}$  更大,说明 DSS 激励的超声导波对裂纹更敏感;在相同的传播距离下, DSS 激励的导波信号  $\alpha_L$  更小,说明 DSS 激励的超声导波正常传播时的衰减更小,传播距离更远。

选取裂纹深度为 9 mm 的试验,分别展示 HWS 与 DSS 所激励的导波经过相同尺寸裂纹时的幅值变化,结果如图 3 所示。



a) 未扩频的 HWS 信号 b) 扩频 HWS 信号计算波形

图 3 经过 9 mm 裂纹之后不同导波幅值的变化

Fig.3 Changes in different guided wave amplitudes after 9 mm cracks

经过深度为 9 mm 裂纹之后不同导波衰减系数的变化如表 1 所示。

由表 1 可知:对于深度为 9 mm 的轨底裂纹,在 RE 间距分别为 100 mm、120 mm 及 150 mm 下,  $\alpha_{pd}$  分别提升了 4.35 dB、1.601 dB 和 5.6 dB;相较于 HWS 激励时,经过扩频技术处理后的 DSS 激励时的  $\alpha_{pd}$  均值提升了 3.847 dB。可见,本文所提的导波信号增强技术对钢轨底部的裂纹更加敏感,从而更易检测出钢轨轨底中的裂纹。

表 1 经过 9 mm 裂纹之后不同导波衰减系数的变化

Tab.1 Changes in different guided wave attenuation coefficients after 9 mm cracks

间距/ mm	裂纹深度/ mm	HWS 激励时 $\alpha_{pd}$ /dB	DSS 激励时 $\alpha_{pd}$ /dB
100	9	9.715	14.065
120	9	13.156	14.757
150	9	10.303	15.903

### 3 结语

本文在传统的超声导波轨底裂纹检测技术基础上,以 Barker 码作为伪随机序列码,采用 BPSK 技术将原始的 HWS 激励信号编码调制后得到新的激励信号,实现对激励信号的扩频处理。在试验中,分别对 3 mm、6 mm 及 9 mm 等不同深度的钢轨轨底人工裂纹进行了试验验证。分别用未经处理的原始激励信号 HWS 和使用了本文提出的编码扩频技术 DSS 进行试验,计算了导波裂纹衰减系数  $\alpha_{pd}$ 、距离衰减系数  $\alpha_L$ 。

试验结果表明,使用本文所提的信号增强技术之后,导波信号距离衰减系数得到了约 2.3 dB 的明显降低,导波信号将能传播更远距离;导波裂纹衰减系数得到了约 3.8 dB 的明显提高,相同尺寸的裂纹所产生的衰减影响更为显著,导波轨底裂纹检测的灵敏度明显更高,可为轨底的小裂纹检测提供有力支持。

### 参考文献

- [1] 周浩,郑筱婷. 交通基础设施质量与经济增长:来自中国铁路提速的证据[J]. 世界经济, 2012, 35(1): 78.  
ZHOU Hao, ZHENG Xiaoting. Traffic infrastructure quality and economic growth: evidence from China railway speed-up[J]. The Journal of World Economy, 2012, 35(1): 78.
- [2] 张辉,宋雅男,王耀南,等. 钢轨缺陷无损检测与评估技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 11.  
ZHANG Hui, SONG Yanan, WANG Yaonan, et al. Review of rail defect non-destructive test-ing and evaluation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 11.
- [3] LOVEDAY P W, LONG C S, RAMATLO D A. Ultrasonic guided wave monitoring of an operational rail track[J]. Structural Health Monitoring, 2020, 19(6): 1666.
- [4] 胡剑虹. 基于超声导波的钢轨轨底无损检测关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.  
HU Jianhong. Research on key technology of nondestructive testing of rail bottom based on ultrasonic guided waves[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

(下转第 268 页)

## 4 结语

本文通过对城市轨道交通车辆基地检修平台栏杆打火及出入场线绝缘节打火问题的现场检测及数据分析发现:

1) 检修平台栏杆打火是由正线钢轨泄漏至车辆基地的杂散电流引起的。泄漏的杂散电流通过单向导通装置再流回正线形成完整的电流通路。

2) 出入场线绝缘节打火由回流不畅造成的轨回流升高、绝缘节压差增大导致。此外,由于单向导通装置中消弧装置可控硅受最小维持电流、开通电压等特性影响,绝缘节两端不能达到金属性电气连接的效果,从而导致消弧效果不理想。

对此,本文提出采用智能导通装置替换单向导通装置的解决措施。现场应用结果表明,智能导通装置改造简单、可靠性高、运营维护方便,能有效解决了车辆基地内打火等一系列问题,在城市轨道交通车辆基地中具有较强的实用性,值得推广应用。

## 参考文献

[1] 王宝顺. 地铁车辆段/停车场的杂散电流打火问题分析及回流

(上接第 263 页)

- [5] HU P, WANG H, TIAN G, et al. Wireless localization of spallings in switch-rails with guided waves based on a time-frequency method[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(23): 11050.
- [6] 袁倍琦. 超声导波断轨检测算法设计及硬件实现[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- YUAN Beiqi. Algorithm design and hardware implementation of ultrasonic guided wave track breaking detection[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [7] 赵华维, 崔建华. 直接序列扩频系统抗雷达脉冲干扰的研究[J]. 通信技术, 2008, 41(4): 38.
- ZHAO Huawei, CUI Jianhua. Research on radar's pulsed noise interference to DSSS[J]. Communications Technology, 2008, 41(4): 38.
- [8] 姚振静. 超声扩频测距脉冲编码激励与渡越时间估计[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- YAO Zhenjing. Pulse coded excitation and time-of-flight estimation of ultrasonic spread spectrum range[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [9] WIDODO S, SHIIGI T, THAN N M, et al. Wind compensation for an open field spread spectrum sound-based positioning system

系统优化[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(11): 160.

WANG Baoshun. Analysis of arcing problem caused by stray current and backfeeding system optimization in metro vehicle depot and stabling yard[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(11): 160.

- [2] 廖钧, 刘炜, 许伶俐, 等. 地铁停车场和车辆段杂散电流实测与分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(8): 64.

LIAO Jun, LIU Wei, XU Lingli, et al. Actual test and analysis of stray current in metro parking lot and depot[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(8): 64.

- [3] 靳凯. 地铁停车场杂散电流防护设计的几个关键问题[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(6): 180.

JIN Kai. Key issues in stray current prevention design for metro depot[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(6): 180.

· 收稿日期:2023-01-28 修回日期:2023-02-28 出版日期:2025-04-10

Received:2023-01-28 Revised:2023-02-28 Published:2025-04-10

· 通信作者:陆煜旻,高级工程师,83340740@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

using a base station configuration[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2014, 7(3): 127.

- [10] 王好贞. 基于 Barker 编码激励方式的断轨检测算法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.

WANG Haozhen. Research on broken track detection algorithm based on Barker coding excitation mode[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.

- [11] 陈嘉兴, 刘志华. 扩展频谱通信[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2013.

CHEN Jiaying, LIU Zhihua. Spread spectrum communication[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2013.

· 收稿日期:2023-09-19 修回日期:2023-11-16 出版日期:2025-04-10

Received:2023-09-19 Revised:2023-11-16 Published:2025-04-10

· 第一作者:何继平,高级工程师,hejiping@sz-mtr.com

通信作者:刘勇,高级工程师,23804612@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