

脉冲压缩在超声导波钢轨断裂检测的应用研究^{*}

许溢航 王 平 杨 元 王 勇

(南京航空航天大学自动化学院 南京 211106)

摘 要: 为提高超声导波钢轨断裂检测距离与断面定位精度,保证钢轨服役期间安全性。本研究采用 Barker 码编码方式与凯塞窗函数对激励信号进行调制,扩展激励信号时宽,增强发射信号能量,通过对检测信号进行脉冲压缩处理,提高缺陷信号分辨率。开展有限元仿真研究,搭建钢轨三维仿真模型,并模拟钢轨断裂损伤情况。钢轨断裂程度为 20% 时,采用多周期正弦波信号激励,直达波信号的主波包信号与相邻波包信号峰峰值之比为 1.065,而采用 Barker13 编码信号激励,直达波信号的主波包信号与相邻波包信号峰峰值比提高到 2.542。分析不同断裂程度下的缺陷回波信号特征,采用 Barker13 编码激励信号回波信号强度幅值变化在 40 dB 以上,经有限元仿真研究可知,编码激励与脉冲压缩技术有效提高检测信号的分辨率与信号幅值。结合线下长距离钢轨检测实验,采用多周期正弦波信号所得到的检测信号,始波与回波信号成分复杂,时间差计算困难,而脉冲压缩技术有效提高检测信号信噪比,改善始波信号与回波信号的信号分辨率,断面定位准确率为 99.3%。编码激励和脉冲压缩技术有效提高检测信号的幅值以及检测定位精度,为长距离钢轨断面定位提供技术手段。

关键词: 钢轨断裂;超声导波检测;巴克码;凯塞窗;脉冲压缩

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on the application of pulse compression in ultrasonic
guide wave rail fracture detection

Xu Yihang Wang Ping Yang Yuan Wang Yong

(School of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to improve the detection distance and section location accuracy of rail fracture with ultrasonic guided wave and ensure the safety of rail during service. In this study, Barker code encoding and Kaiser window function were used to modulate the excitation signal, expand the excitation signal time width, enhance the energy of the transmitted signal, and improve the resolution of the defect signal through pulse compression processing of the detected signal. The finite element simulation was carried out, the rail 3D simulation model was built, and the rail fracture damage was simulated. When the rail fracture degree is 20%, the peak-to-peak ratio of the main wave packet signal and the adjacent wave packet signal of the direct wave signal is 1.065 by using multi-period sine wave signal excitation, while the peak-to-peak ratio of the main wave packet signal and the adjacent wave packet signal is increased to 2.542 by using Barker13 coded signal excitation. The characteristics of defect echo signal under different fracture degrees are analyzed, and the amplitude of the echo signal intensity changes above 40 dB by Barker13 coded excitation signal. The finite element simulation shows that the encoded excitation and pulse compression technology can effectively improve the resolution and signal amplitude of the detected signal. Combined with the offline long-distance rail detection experiment, the detection signal obtained by using multi-period sine wave signal has complex components and difficult calculation of time difference. However, pulse compression technology can effectively improve the signal-to-noise ratio of detection signal and improve the signal resolution of the initial wave signal and the echo signal, and the accuracy rate of section positioning is 99.3%. Coding excitation and pulse compression technology can improve the amplitude of detection signal and the accuracy of detection and positioning effectively, and provide technical means for long-distance rail section positioning.

Keywords: rail breakage; ultrasonic guided wave detection; Barker code; Kaiser window; pulse compression

0 引 言

钢轨作为城市轨道交通的重要基础设施,肩负着列车

安全运行的责任。受温度应力及使用年限的影响,钢轨易发生胀轨、形变等情况,严重时可能发生钢轨断裂^[1-3]。作为钢轨最为严重的损伤之一,钢轨断裂发生具有不确定性。

随着地铁线路覆盖面积不断增加,人工探伤效率不能够满足检测需求,为保证居民的人身安全和列车的平稳运行,需引入新的检测技术,实现钢轨断裂状态的实时在线监测。

超声导波检测技术,具有一次检测距离远,能量集中,方向性好等特点。超声导波长距离检测早期多应用于管道检测领域^[4-5],国内钢轨检测领域,学者任远^[6]最早引入超声导波检测方法,开展了实时断轨检测研究,依靠仿真平台进行钢轨健康状况分类。李浩^[7]通过搭建硬件平台,测定超声导波在钢轨中的衰减曲线,通过分析直达波信号幅值变化,实现钢轨的长距离检测。魏小源^[8]为满足钢轨长距离检测需求,针对超声换能器进行优化设计。汪震等^[9]为实现超声导波远距离检测,设计了一款基于FPGA的宽带激励源。

近年来,随着超声导波检测技术的兴起,钢轨长距离检测出现了以下几个问题:1)检测过程存在电噪声、振动噪声等环境噪声干扰,导致检测信号信噪比低,影响缺陷信号的识别。2)钢轨断裂定位困难,有关钢轨长距离检测的研究,多采用透射衰减法进行钢轨探伤,通过分析直达波信号衰减规律,实时判断钢轨健康状况,钢轨断裂出现时定位断裂所在区间,定位精度低;3)检测距离受限,提高驱动信号电压易损坏换能器探头,增加激励信号的脉冲宽度,虽然能够实现更远距离的导波信号传播,但多周期激励信号会导致缺陷回波分辨率降低。

编码激励与脉冲压缩技术可以有效解决以上问题,通过编码激励大时宽信号,提高发射信号能量,并对超声导波检测信号进行脉冲压缩,可以在不提高激励信号平均功率的前提下,提高系统的监测距离和定位精度,有效保护硬件电路,实现断裂损伤的强监测,保证列车的安全运行。脉冲压缩技术最早应用于雷达信号处理领域,旨在提高探测距离及分辨性能^[10-12]。王好贞等^[13]将编码激励和脉冲压缩技术应用在超声导波断轨检测中,在短距离钢轨上进行了实验验证与仿真分析,旨在提高检测信号幅度和辨识度。周文涛^[14]将该技术与超声导波检测技术相结合,进行钢轨轨底裂纹识别研究。目前国内外学者多采用该技术在短距离钢轨上进行实验研究,旨在实现钢轨微小损伤的识别与检测信号的幅值提高^[13-15],对长距离情况下的钢轨断面定位检测相关研究较少。

本研究以无缝线路作为研究对象,提出了一种基于Barker码编码激励超声导波信号的脉冲压缩钢轨断面定位检测技术。搭建钢轨有限元仿真模型,对比编码脉冲压缩技术与多周期正弦波激励方式的检测信号特征,分析不同断裂程度下直达波与回波信号之间的差异。最后在160 m的无缝线路区间,进行钢轨端面定位实验,验证编码激励和脉冲压缩技术的可行性。

1 原理

1.1 超声导波检测原理

超声导波钢轨断裂定位检测方法采用脉冲回波方法,

通过计算缺陷回波与始波的时间差,结合超声导波的传播速度,实现钢轨断面定位,原理如图1所示。

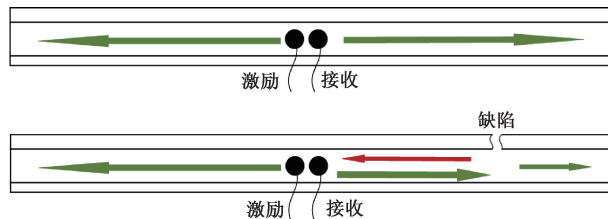


图1 脉冲回波法

Fig. 1 Pulse echo method

1.2 Barker 编码激励

Barker码作为二相编码方式,具有良好的自相关特性,长度为N的Barker码由不同相位的多个码元组成,每个码元的取值范围为“1”和“-1”,该值决定了码元的相位选择^[15]。

$$B(N) = [a_0, a_1, \dots, a_{n-1}], a_i \in \{-1, 1\} \quad (1)$$

编码信号经脉冲压缩后,在信号主瓣旁会出现旁瓣,通常采用峰值旁瓣水平(peak sidelobe level, PSL)来评估信号经脉冲压缩后的距离旁瓣抑制效果不同长度的Barker码序列排列方式及峰值旁瓣抑制水平如表1所示。

$$PSL = 20\log N \quad (2)$$

式中:N为编码序列长度。

表1 Barker码的自相关函数序列

码长 N	自相关函数序列	PSL/dB
2	++, + -	6.02
3	++ -	9.54
4	++++, +-+-	12.04
5	++++ -	13.98
7	++++ - - -	16.90
11	++++ - - - - -	20.83
13	++++ - - - - - - -	22.28

1.3 脉冲压缩技术

激励信号采用编码激励方式,对检测信号进行匹配滤波的过程又称为脉冲压缩^[16],解码过程为:

$$s_r(t) = s(t) * h(t) + n(t) \quad (3)$$

式中: $s_r(t)$ 为接收到的超声导波信号, $s(t)$ 为编码激励信号, $h(t)$ 为传递函数, $n(t)$ 为噪声干扰。

$$s_p(t) = \int_0^T s(t) * s_r(x) dx \quad (4)$$

式中: $s_p(t)$ 为脉冲压缩后的信号,T为接收信号总长度,x为自变量。

图2(a)为13位Barker码信号,经脉冲压缩后,信号如图2(b)所示。

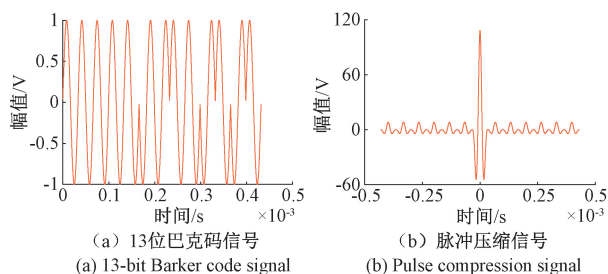


图 2 13 位 Barker 码信号脉冲压缩

Fig. 2 Pulse compression of 13-bit Barker code signal

2 有限元仿真实验

本次研究采用 ABAQUS 仿真软件,搭建长度为 10 m 的 CHN60 型钢轨有限元仿真模型,在距离端面 7.5 m 处制造人工断裂损伤,仿真实验示意图如图 3 所示,通过模型切削的方式,在钢轨模型的特定位置制造断裂损伤,损伤程度从 10% 到 90%,如图 4 所示。

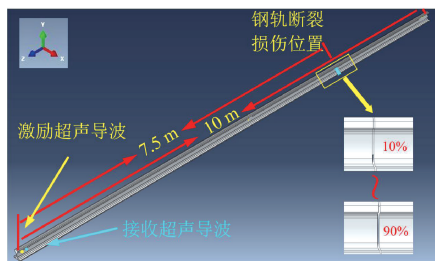


图 3 钢轨仿真模型

Fig. 3 Rail simulation model

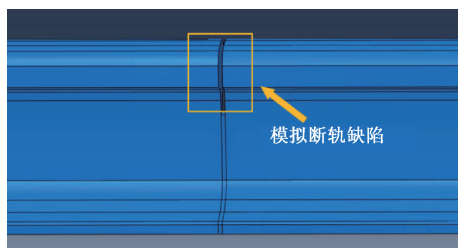


图 4 钢轨断裂损伤模拟

Fig. 4 Rail fracture damage simulation

传统超声导波激励信号为多周期正弦波信号,经实验研究可知,采用窄带宽激励信号有利于导波检测信号的模态分离^[17],本次研究采用的激励信号为不同序列长度的 Barker 码编码激励信号,并采用凯塞(Kaiser)窗对激励信号进行加窗处理,抑制旁瓣同时减少频谱泄露:

$$w(n) = I_0\left(\beta \sqrt{1 - \left(\frac{2n-N}{N}\right)^2}\right) / I_0(\beta), 0 \leq n \leq N \quad (5)$$

式中: $I_0(\beta)$ 是第一类零阶修正贝塞尔函数, β 是窗函数的形状参数。

相比于汉宁窗与海明窗,凯塞窗具有更好的时频特性,

3 种窗函数的时域图与频率响应如图 5 所示,观察图 5(b) 可以发现,凯塞窗的第一旁瓣相对幅值较小,旁瓣抑制效果较优,并且凯塞窗可以在不同频谱特性情况下灵活调整主瓣宽度和旁瓣抑制能力,满足不同应用场景需求。

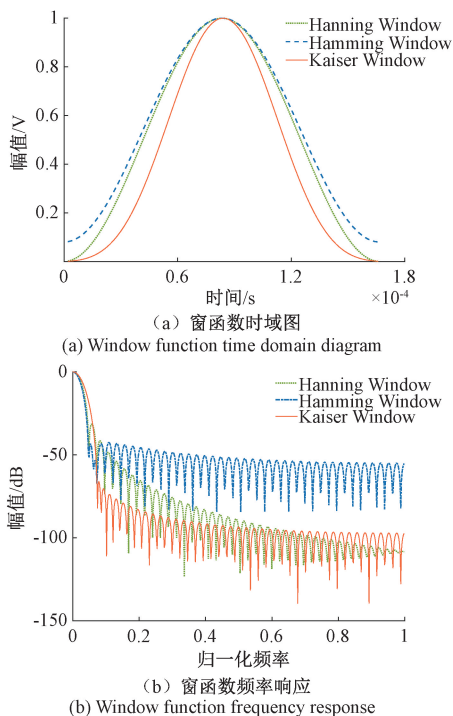


图 5 窗函数时域图及频率响应

Fig. 5 Window function time domain diagram and frequency response

5 周期正弦波信号如图 6(a)所示,经凯塞窗加窗处理,得到图 6(b)所示信号,此信号为 Barker 编码序列信号的码元“1”,与该信号相位相反的信号为码元“-1”。

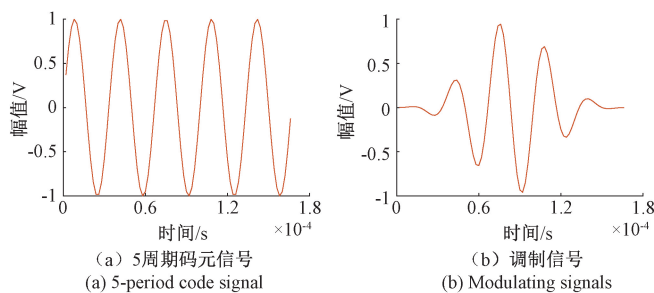


图 6 信号加窗调制

Fig. 6 Signal and window modulation

仿真实验激励信号分别为 20 周期正弦波信号, Barker3 编码调制信号、Barker4 编码调制信号与 Barker13 编码调制信号,如图 7 所示。

为直观的对比较编码脉冲压缩技术与多周期正弦波激励方法的检测效果,分析直达波信号,如图 8 所示。

不同激励方式下的直达波信号的主波包信号峰峰值 V_m 与相邻波包信号峰峰值 V_n 之比如表 2 所示。

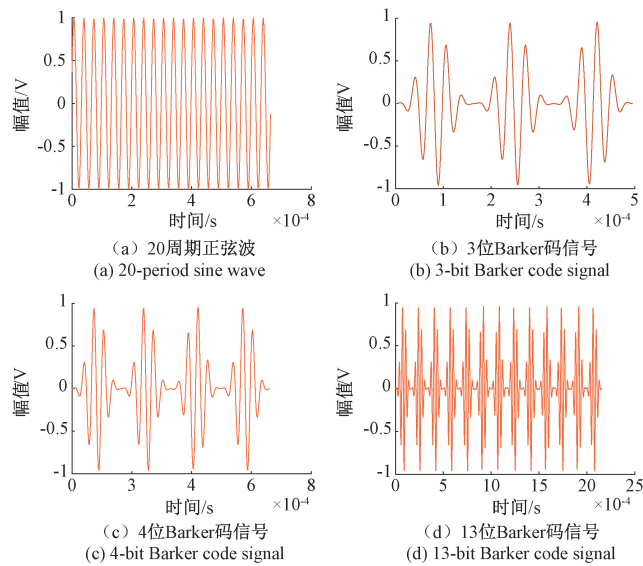


图 7 4 种激励信号
Fig. 7 Four kinds of excitation signals

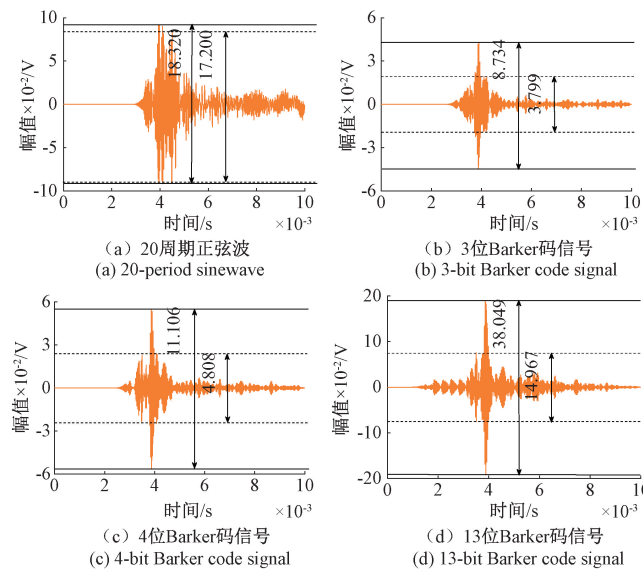


图 8 不同激励情况下断轨程度 20%直达波信号
Fig. 8 Direct wave signal of 20% rail break degree under different excitation conditions

表 2 信号峰值比

Table 2 Main sidelobe signal peak ratio

激励方式	主波包信号峰 峰值 V_m	相邻波包信号峰 峰值 V_n	V_m/V_n
20sinwave	1.832×10^{-3}	1.72×10^{-3}	1.065
Barker3	8.734×10^{-2}	3.794×10^{-2}	2.302
Barker4	11.106×10^{-2}	4.808×10^{-2}	2.310
Barker13	38.049×10^{-2}	14.967×10^{-2}	2.542

激励信号同周期情况下,Barker4 激励信号情况下采

集到的直达波信号相比于传统 20 周期正弦波,主波包信号峰峰值为其 60.62 倍,信号分辨率提高。编码激励条件下,主要信号特征明显,随编码序列的增加,直达波信号幅值显著增强,其中,采用 Barker13 激励信号,主波包信号与相邻波包信号的峰峰值之比为 2.542,主波包信号时域特征明显。编码激励情况下,主波包能量集中,信号分辨率显著提高。

为进一步验证编码激励和脉冲压缩技术在钢轨断裂定位检测的可行性,观察回波信号的变化规律,图 9 为 0%~80%钢轨断裂情况下的缺陷回波信号示意图。通过将回波信号能量以色带图呈现,如图 10 所示,可以直观地分析缺陷回波的信号特征,20 周期正弦波激励的颜色栏范围刻度为 $0 \sim 6 \times 10^{-3}$,缺陷回波信号幅值小,并且端面回波时宽大。编码激励情况下,回波信号能量显著增强,此外,结合信号时域图,Barker13 激励信号虽然为大时宽激励信号,但是缺陷回波特征明显,信号分辨率不受激励信号时宽影响。

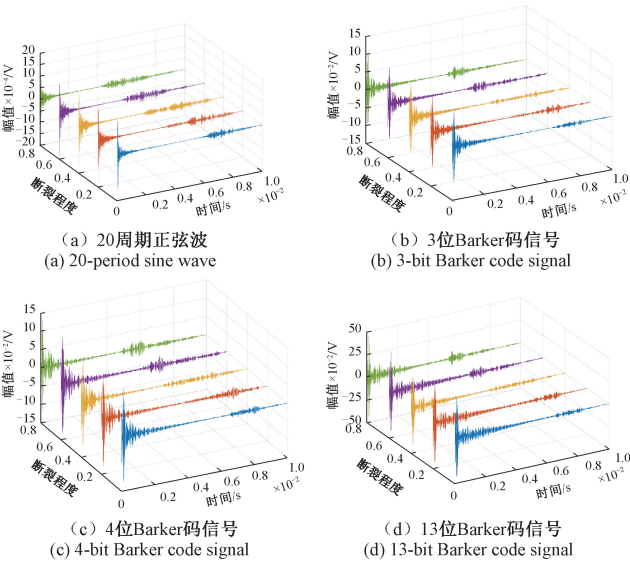


图 9 不同断轨程度下回波信号
Fig. 9 Echo signal under different degree of rail failure

考虑到仿真信号幅值的数量级,提出信号幅值变化强度(echo change amplitude,ECA)来衡量不同激励情况下的检测效果:

$$ECA = 20\lg[10^4 \times (V_d - V_h)] \quad (6)$$

式中: V_d 为损伤信号幅值, V_h 为健康信号幅值。

缺陷回波信号幅度变化曲线如图 11 所示。采用 20 周期正弦波激励信号,缺陷回波信号强度幅值变化较小,回波信号强度幅值变化在 20 dB 以下,采用编码激励和脉冲压缩技术,回波信号幅值显著增强,其中,Barker13 编码激励信号下,回波信号强度幅值变化在 40 dB 以上,因此后续线下实验采用 Barker13 编码信号作为激励信号。

为计算超声导波在钢轨中的传播速度,分析钢轨断裂

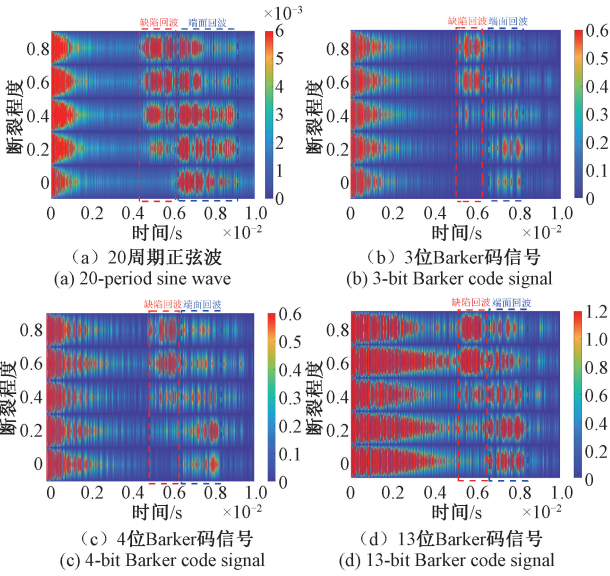


图 10 回波信号色带图

Fig. 10 Energy color band diagram of echo signal

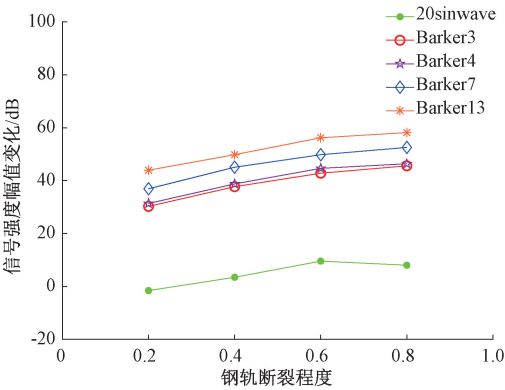


图 11 回波幅度变化曲线

Fig. 11 Echo amplitude curve

程度 80% 下的回波信号, 可知始波和缺陷回波相隔时间为 5.432×10^{-3} s, 断裂损伤距离钢轨端面 7.5 m, 计算可得超声导波传播群速度约为 2 760 m/s。

分析有限元仿真实验结果可知, 编码脉冲压缩技术相比于 20 周期正弦波激励方式而言, 能在抑制干扰信号同时提高主成分信号能量。在钢轨断裂情况下, 采用编码激励和脉冲压缩技术能够提高缺陷回波信号的识别能力。

3 实验验证

实验平台由超声换能器, 信号发生器(SDG 2082X), 功率放大器(7602M, KH/Krohn-Hite), 信号调理电路和示波器组成。其中, 采用功率放大器将激励信号电压提高到 200 V, 信号调理电路采用 AD8231 程控增益芯片, 实现检测信号的 1~128 倍信号增益, 实验平台如图 12 所示。

地铁线路钢轨长期处于健康状态, 故采用无缝线路钢轨端面模拟实际断轨情况, 实验场地为 160 m 无缝钢轨区

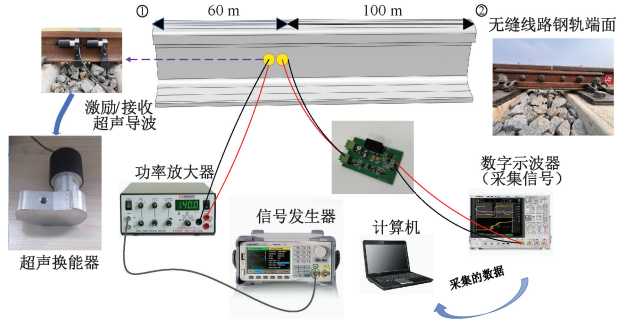


图 12 实验平台搭建

Fig. 12 Experimental platform construction

间, 设备安装在距离左侧端面 60 m 处。

采用 Barker13 编码信号激励, 检测信号时域图如图 13(a)所示, 并对检测信号进行脉冲压缩, 得到图 13(b)所示信号, 相比于图 13(a)多周期正弦波激励下的检测信号, 始波信号更加集中, 端面回波信号分辨率提高, 此外, 信号中的噪声干扰成分得到有效滤除。

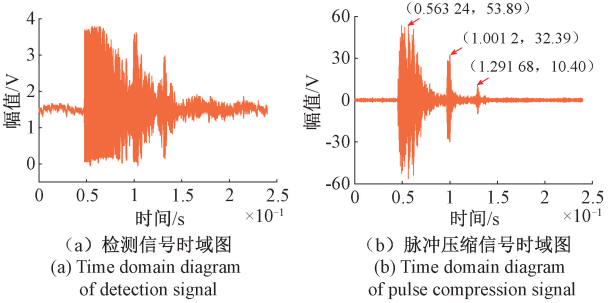


图 13 不同激励信号-对比图

Fig. 13 Different excitation-signal comparison diagram

经脉冲压缩后的检测信号, 始波与回波信号明显, 时间间隔 $4.379 6 \times 10^{-2}$ s, 经计算, 检测设备与端面 1 相隔距离 60.4 m, 定位误差为 0.66%, 二次回波距始波相隔 $7.284 4 \times 10^{-2}$ s, 经计算, 检测设备与端面 2 相隔距离 100.5 m, 定位误差为 0.5%。多周期正弦波激励方式下, 始波成分复杂, 且信号干扰较多, 不能有效计算始波与回波之间的时间差。相比于多周期正弦波激励方式, 采用编码激励和脉冲压缩技术, 定位精度明显提高。

编码激励与脉冲压缩技术能够有效提高主成分信号峰值, 并对外界干扰具有滤波作用, 提高了缺陷回波的识别能力与定位精度, 为钢轨断面定位检测提供了有效技术手段。

4 结 论

为提高超声导波检测系统的检测距离与钢轨断裂的定位精度, 本文提出编码激励和脉冲压缩技术作为超声导波检测的技术手段, 采用巴克码编码与凯塞窗函数对激励信号进行调制, 增强发射信号能量, 并对检测信号进行脉冲压缩处理。

分析有限元仿真和线下实验结果, 得出以下结论: 相较

于多周期正弦波激励方式,编码激励和脉冲压缩技术有效增强检测信号幅值,直达波主成分信号时宽减小,同时,随钢轨断裂程度的增加,缺陷回波信号幅值变化显著,信号分辨率未受到激励信号时宽增大带来的负面影响;在线下检测实验中,受环境噪声和传播特性的影响,多周期正弦波激励方式下的检测信号成分复杂,不能有效计算始波与回波之间的时间差,而经脉冲压缩处理后的信号,始波与回波信号特征明显,有效滤除信号中的干扰成分,信号分辨率显著提高,断面定位精度为99.3%,缺陷定位准确。

本文结合有限元仿真和钢轨断面定位检测实验,验证了编码激励和脉冲压缩技术在钢轨断裂检测中的可行性,由于实验条件的限制,尚未对长距离钢轨断裂的真实损伤进行分析,后续将继续研究并完善。

参考文献

- [1] 郑皓. 探析高速铁路铁轨的奥秘[J]. 中国设备工程, 2017(19):209-211.
ZHENG H. Exploring the mystery of high speed railway track [J]. China Equipment Engineering, 2017(19): 209-211.
- [2] 徐井芒,王凯,高原,等. 高速铁路无缝钢轨断缝瞬态冲击行为分析[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(6): 1348-1354.
XU J M, WANG K, GAO Y, et al. Analysis of transient impact behavior of seamless rail crack in high speed railway [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(6): 1348-1354.
- [3] 张国印. 高速铁路无缝钢轨纵向应力导波无损检测方法[D]. 南昌:华东交通大学, 2023.
ZHANG G Y. Guided wave nondestructive testing method for longitudinal stress of seamless rail of high speed railway [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2023.
- [4] ROSE J L, ZHANG L, AVIOLI M J, et al. A natural focusing low frequency guided wave experiment for the detection of defects beyond elbows [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2005, 127(3): 310-316.
- [5] PARK I K, KIM Y K, KIM H M, et al. Long range ultrasonic guided wave technique for Inspection of pipes[J]. Key Engineering Materials, 2006, 42(321-323): 799-803.
- [6] 任远. 基于超声导波的实时断轨检测方法研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2010.
REN Y. Research on realtime rail failure detection method based on ultrasonic guided wave[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2010.
- [7] 李浩. 基于超声导波的无缝线路断轨检测系统[D]. 北京:北京交通大学, 2015.
LI H. Seamless line broken track detection system based on ultrasonic guided wave[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [8] 魏小源. 长距离钢轨检测中压电超声换能器的特性优化及应用研究[D]. 西安:西安理工大学, 2020.
WEI X Y. Research on characteristic optimization and application of piezoelectric ultrasonic uransducer in long distance rail detection [D]. Xi' an: Xi' an University of Technology, 2020.
- [9] 汪震,杨嘉睿,娄岱松,等. 基于FPGA的超声导波宽带激励源设计[J]. 电子测量技术, 2023, 46(11):30-36.
WANG ZH, YANG J R, LOU D S, et al. Design of wideband ultrasonic guided wave excitation source based on FPGA [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(11):30-36.
- [10] SAMER B S H. A review of radar signals in terms of doppler tolerance, time-sidelobe level, and immunity against jamming [J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2018, 10(10): 1134-1142.
- [11] 黄莹. 面向雷达信号处理的脉冲压缩及其旁瓣抑制技术的研究与实现[D]. 西安:西安电子科技大学, 2018.
HUANG Y. Research and implementation of pulse compression and sidelobe suppression technology for radar signal processing [D]. Xi' an: Xidian University, 2018.
- [12] 杜秋影. 雷达信号脉冲压缩及干扰对消技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2020.
DU Q Y. Research on radar signal pulse compression and Interference cancellation [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020.
- [13] 王好贞,杨媛,魏小源,等. Barker 编码激励超声导波在断轨检测中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8):101-108.
WANG H ZH, YANG Y, WEI X Y, et al. Application of barker coded excited ultrasonic guided wave in the detection of broken rail [J]. Chinese Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8): 101-108.
- [14] 周文涛,王平,杨元,等. 基于编解码的超声导波轨底裂纹识别方法研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(2): 130-135.
ZHOU W T, WANG P, YANG Y, et al. Research on codec based crack identification method of ultrasonic guided wave track bottom[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(2): 130-135.
- [15] YANG Y, WANG P, JIA Y L, et al. Rail fracture monitoring based on ultrasonic guided wave technology with multivariate coded excitation [J]. Ultrasonics, 2023, 136: 107164.
- [16] 黄祺凯,石文泽,卢超,等. 基于编码压缩的钢板电磁超声 Lamb 波检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2):117-127.
HUANG Q K, SHI W Z, LU CH, et al. Research on electromagnetic ultrasonic lamb wave detection method of steel plate based on coded compression [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 117-127.
- [17] 王握. 基于超声导波的钢轨缺陷检测研究[D]. 南京:东南大学, 2017.
WANG W. Research on rail defect detection based on ultrasonic guided wave [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.

作者简介

许溢航(通信作者),硕士,主要研究方向为超声导波检测与微弱信号处理。

E-mail:hang2659@163.com