

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210434

# 基于编解码的超声导波轨底裂纹识别方法研究

周文涛 王平 杨元 宋天朗  
(南京航空航天大学自动化学院 南京 210016)

**摘要:** 超声导波在针对钢轨小裂纹检测时由于利用高频信号,会导致信号衰减明显,对于小裂纹的检测灵敏度降低,针对细小裂纹难以识别,为提高缺陷信号识别度,本文将 barker 码作为编码方式,并用类 BPSK 作为解码方式,利用到导波检测钢轨小裂纹的信号处理中。通过实验将对钢轨轨底上深度 6 mm 宽度 0.5 mm 的人工裂纹进行验证,为衡量算法效果分别用未经过任何信号处理的原始收发导波信号和经过 barker 码-匹配滤波编解码处理的导波信号与实验方法进行对比。结果表明,利用 barker 码-类 BPSK 编解码处理的导波信号在处理钢轨轨底小裂纹的识别上有着明显的增强作用,效果优于另外两种方法,可以为以后的导波钢轨小裂纹检测提供支持。

**关键词:** 超声导波;钢轨裂纹识别;barker 序列;信号处理

**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 identification method of small cracks on the bottom of ultrasonic guided waves based on codec

Zhou Wentao Wang Ping Yang Yuan Song Tianlang  
(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Ultrasonic guided waves use high-frequency signals in the detection of small cracks in rails, which will lead to significant signal attenuation and reduced detection sensitivity for small cracks. It is difficult to identify small cracks. In order to improve the recognition of defect signals, this paper uses barker code as the encoding method, and use BPSK-like as a decoding method, which is used in the signal processing of guided wave detection of small cracks in rails. The artificial crack with a depth of 6 mm and a width of 0.5 mm on the rail bottom will be verified through experiments. In order to measure the effect of the algorithm, the original transceiver guided wave signal without any signal processing and the guided wave signal processed by the barker code-matched filter codec are used respectively. Compare with the experimental method. The results show that the guided wave signal processed by the barker code-like BPSK codec has an obvious enhancement effect on the identification of small cracks at the bottom of the rail, and the effect is better than the other two methods, which can be used for the detection of small cracks in the guided rail in the future. provide support.

**Keywords:** ultrasonic guided wave; rail crack identification; barker sequence; signal processing

## 0 引言

随着我国高速和重载铁路的发展,现阶段我国经济迅速发展以及多种交通运输方式并存的大环境下,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,被称为“国民经济的大动脉”<sup>[1-2]</sup>,进行钢轨在线无损检测以监控钢轨质量的需要日益迫切。

心轨是铁路线路中结构复杂的区域,也是无损检测的重要区域。在钢轨众多缺陷中,轨底缺陷最为常见,也是传统探伤方法比较难以探测的缺陷。钢轨的缺陷类型包括:

表面裂纹、螺孔裂纹、核伤、磨耗、肥边、掉块、擦伤、鱼鳞伤等,其中钢轨裂纹的影响较大、扩展较快,给铁路运输的安全带来了严重的隐患。因此,及时检测出钢轨的裂纹对保障铁路的安全运营具有重要意义。

超声检测通过激励探头向钢轨中发射超声波信号,再通过接收探头响应观察超声波信号在钢轨中与损伤的交互作用后产生的反射、模态转换和衰减等传播特性的变化,从而判定钢轨中裂纹大小。常规超声探伤车的激励超声波无法传播到轨底中轨腰延伸部以外的区域,且该检测系统对表面缺陷检测能力随着探伤车速度的增大而降低<sup>[2]</sup>。对于

收稿日期:2022-06-23

心轨损伤检测,由于心轨位置较为特殊,导致超声波信号成分复杂,难以准确进行判伤,需探伤仪进行复检<sup>[3]</sup>。为了解决上述问题,近年来出现了一些新型超声钢轨检测技术如超声导波检测技术、超声相控阵检测技术、电磁超声检测(electro-magnetic acoustic testing, EMAT)技术和激光超声检测技术。超声导波检测技术是一种研究因波导材料特性或边界存在而导致的超声波多次反射和纵横波转换现象的检测技术,该检测技术具有检测效率高和传播过程可覆盖钢轨全截面的优点,可以应用于钢轨裂纹的检测。Cawley等研究了使用超声导波检测20 m长钢轨的横向和垂直损伤。同时根据收发方式的特点区分损坏的类型。Loveday等<sup>[4]</sup>给出了一个经典的轨旁超声检测系统的例子。在此系统的基础上,进一步提出了一种基于SVD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。卢超等<sup>[5]</sup>研究了钢轨垂直振动模态和该振动方向的导波频散曲线,验证了高频钢轨垂直振动模态与Rayleigh-Lamb波相似。胡剑虹<sup>[6]</sup>开发了可以检测到道岔钢轨底部截面积的5%在线缺陷检测系统。范振中将小波包变换应用于道岔导波信号处理,研究了基于小波包能谱的道岔损伤识别方法。胡洋等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<sup>[7]</sup>。超声波导波检测技术可检测道岔全面缺陷,导波传播距离长、速度快。但是,目前的道岔导波检测系统仍以实验室环境或有线路旁检测系统为主,需要保障,在保证检测精度的前提下效率较低。

目前,针对超声导波信号的预处理,已经有学者做了一些研究。Barker码是最常用的一种单次发射二进制编码,它的自相关函数的主旁瓣比是相同长度的二进制序列中最高的<sup>[8]</sup>,目前已知的最长的Barker码只有13位。Barker码之前多被应用于雷达通信系统中,后来也逐渐被应用到超声领域,如超声彩色血流成像<sup>[9]</sup>,经颅多普勒超声系统<sup>[10]</sup>中等。典型的脉冲压缩信号有3类:线性调频(LFM)信号、非线性调频(NLFM)信号和相位编码(PSK)信号,其中相位编码信号在时宽带宽积较小的情况下,主副比大,压缩性能好,受到了广泛的重视<sup>[11]</sup>。各种工业若干领域的在线检测、动态检测明显增多,对超声检测设备提出了更高要求,促使超声检测系统将进一步向高精度、高分辨率方向发展,检测渐趋于实时化、定量化。并且由于相位编码采用伪随机序列信号,易于实现信号“捷变”,有利于提高信号的抗截获能力。本文将相位编码脉冲压缩技术用于检测钢轨小裂纹的导波信号增强中,提高信号识别灵敏度。

## 1 轨底裂纹导波检测实验介绍

### 1.1 超声导波检测原理

超声导波的作为一种机械振动在弹性介质中传播,属

于声波的一种,其频率一般高于20 kHz。在传播过程中,在理想情况下,导波会沿传播介质随距离增加而逐渐衰减;当遇到边界会产生大量的反射和衰减,使其波形幅值远小于理想情况下波形幅值。因此,当钢轨表面有裂纹产生时,导波经过裂纹处会发生明显的衰减,且随着裂纹大小的变化而变化。

相速度与群速度是反映导波速度的两个重要概念。群速度是指导波波包的包络(或振幅的最大值)在介质中的传播速度<sup>[12]</sup>,同样可认为是波的能量随着波动向前传播的速度。

相速度则是反映导波上固定相位点沿着传播方向的传播速度<sup>[13]</sup>,相速度指的是某一频率简谐波的波速,而群速度是指脉冲波的速度及波包包络的传播速度。

群速度其中包含不同频率简谐波的叠加而形成的包络信号,其振幅最大值的传播速度就是群速度。

若一谐波沿 $x$ 轴正方向传播,则其振动方程为:

$$u = A \cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

式中: $u$ 为质点振动的位移, $A$ 为振幅, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, $x$ 为波传播的位置矢量, $\omega$ 为振动的角频率, $t$ 为时间变量, $(kx - \omega t)$ 为波相,令 $kx - \omega t = C$ 并微分,能够得到相速度表达式:

$$v_p = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} = \lambda f \quad (2)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ , $f$ 为简谐波频率; $k = 2\pi/\lambda$ , $\lambda$ 为波长。

导波通常是以波包形式传播,然而对于导波波包,它在一定的频率范围内均有一定能量,同时这些不同频率成分分别以不同的相速度进行传播,整体上波包以群速度向前传播。

### 1.2 实验平台介绍

本文的超声导波换能器是采用压电陶瓷片,它本身作为一种压电材料,具有压电效应和逆压电效应,可以将电量和机械量相互转换,从而产生导波传入钢轨,并将经过钢轨传播的超声导波重新转换成电信号。实验平台的组成部分有超声导波换能器、信号发生器、功率放大器、示波器以及待检测钢轨。钢轨缺陷类型为轨底裂纹,裂纹深度为6 mm,裂纹宽度为0.5 mm,如图1所示。

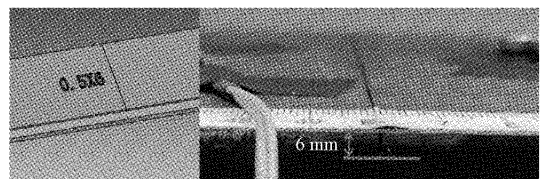


图1 轨底6 mm深度人工裂纹

选用两个200 kHz的压电陶瓷片作为实验的一组传感器探头,一组探头中,一个作为发射导波的激励装置,另一个作为接收钢轨中导波的接收装置。将这一组探头固定在钢轨轨底处,两个探头间距10 cm,轨底裂纹存在于两个探

头中间处。利用信号发生器将预设的导波波形发射,经过功率放大器增大信号驱动,将放大后信号接入用于激励的探头,探头在正压电效应下产生预设频率的机械能,作为导波信号传入钢轨;导波信号经过轨底裂纹后发生衰减。钢轨裂纹检测模型如图 2 所示。

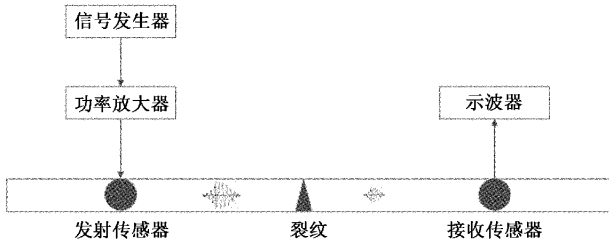


图 2 钢轨裂纹检测模型

## 2 小裂纹信号识别算法

### 2.1 barker 编码激励

相比于未编码的激励方式而言,编码激励的方式则采用持续或多组的编码信号来激励导波换能器。目前常用的编码方式可根据发射内容分为二进制相位编码序列,线性调频信号等;也可以根据编码信号发射次数分为单次发射编码和多次发射编码<sup>[14-15]</sup>,如表 1 所示,经对比采用仅需单次发射的相位编码的 Barker 码。编码激励的持续时间比换能器的脉冲响应时间长,故而可使得发射的超声信号可以携带更多能量,提高信号平均功率。

$$R_{Bk}(j) = \sum_{i=1}^{N-|j|} x_i x_{i+j} = \begin{cases} N & j = 0 \\ 0 \text{ 或 } \pm 1 & j \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

Barker 码作为一种常用的二进制编码序列,每个码元取值为 +1 或 -1,对于一个长度为 N 的 Barker 码,其自相关函数可以表示为式(3),自相关函数的最大旁瓣在 ±1 之间,其主旁瓣根据编码长度 N 变化,即自相关的峰值为 N<sup>[16]</sup>,其在长度相同的二进制编码当中主旁瓣比值最高。并且 Barker 码具有很好的自相关特性,表明具有很好的抗干扰特性,可以使有效信号更容易提取。

表 1 编码方式

	单次发射	多次发射
频率编码	Chirp 码	
相位编码	Barker 码、M 序列	Golay 码

针对 Barker 码这种较为常见的二进制相位编码序列,编码序列可以式(4)表示,用该序列去调制汉宁窗调制后的载波信号,这样可以得到编码调制后的激励信号。即通过解码方式使序列在可用的带宽范围内进行传输。在采用二进制相移键控(binary phase shift keying, BPSK)调制方式时,载波信号的相位随着调制所用基带信号的状态不同而改变。例如, Barker 码的调制信号为“1”时,调制后的波形相位与未调制信号相位相同;当调制信号为“-1”时,调

制后波形相位与未调制信号相位相反,在两种调制信号下的载波信号相位相差 180°。

$$B[N] = [a_0, a_1, \dots, a_{N-1}], a_i \in \{-1, +1\} \quad (4)$$

由于汉宁窗调制后的正弦波的频谱较窄,可以一定程度的抑制导波的频散特性,适用于本实验检测要求,将载波信号  $a(t)$  先通过汉宁窗  $h(t)$  调制,根据相关资料的研究以及相关实验可知,汉宁窗调制正弦波的周期数的取值选用五周期的最为合适作为激励波形<sup>[17]</sup>。

$$a(t) = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t_m) \quad (5)$$

$$h(t) = [1 - \cos(2 \cdot \pi \cdot t_m)/n] \quad (6)$$

其中,  $n$  为五波峰的波峰数量。

$$c_1 = a(t)h(t) = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t_m) \cdot$$

$$[1 - \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t_m)] \quad (7)$$

$$s(t) = c_1(t) \cdot B[N] \quad (8)$$

调制信号是在汉宁窗调制的正弦信号的基础上使用巴克码作为码序列进行调制,即对一个正弦的载波信号依次进行了汉宁窗调制和码序列调制,得到一个编码后的信号  $s(t)$ 。对于码序列调制后的信号,当序列中的一位为 1 时,调制的波形与未调制的同相;当序列中的一位为 -1 时,调制的波形与未调制的反向,调制码序列的载波相位相差 180°,其中调制的表达式如下:

$$b[k] = \sum_{i=0}^{N_c \cdot P - L - 1} c \left[ \frac{i}{N_c \cdot P} \right] \cdot m \left[ \frac{i}{N_c \cdot P} \right] \quad (9)$$

其中,上述公式为汉宁窗调和码序列调制信号  $b[k]$ ;  $m[L]$  为汉宁窗调制信号;  $N_c$  时每一位序列码调制的载波信号的周期数,此处为  $N_c = 5$ ;  $c[k]$  则为调制的编码序列;  $L$  是编码序列长度,此处取巴克码序列长度为  $L = 13$ 。

$$e[k] = \sum_{i=0}^{N_c \cdot P - L - 1} c \left[ \frac{i}{N_c \cdot P} \right] \cdot p[k - i] \quad (10)$$

其中,上述公式为发射端的发射信号  $e[k]$ ;  $p[k]$  为正弦的载波信号,  $P$  为每个周期的采样点数。

### 2.2 类 BPSK 的解码方式

导波信号经过钢轨传播后,在接收端可以接收到的信号包括有效激励信号  $s_1(t)$ 、噪声信号  $n(t)$  等信号,即收到信号可用式(11)表示。

$$r(t) = s_1(t) + n(t) \quad (11)$$

从上述公式中可以得知,接收端接收到的信号与发送端的信号的频率相同,对应起始时间或初始相位,用原始的预设频率的载波信号  $p[k]$  与接收信号  $r[k]$  相乘,相乘可得:

$$d[k] = \sum_{i=0}^{N_c \cdot P - 1} r[i + k] \cdot p[i] \quad (12)$$

其中,  $d[k]$  为接收端与载波信号相乘后的结果,  $N_c$  时每一位序列码调制的载波信号的周期数,此处为  $N_c = 5$ 。

将巴克码和汉宁窗调制拟作一个正弦低频信号  $b[k]$ ,而载波信号作为一个正弦高频信号  $p[k]$ ,经过编码时相乘,后面再将接收到的信号和正弦高频信号相乘,两次相乘

可以得到两次积化和差计算结果,根据积化和差公式,可得到3个不同频率的信号,结果中一个为巴克码和汉宁窗调制信号 $b[k]$ ,其余两个则是两个高频信号,将计算后的信号进入滤波器,高频信号滤除,经过上述过程可将所需的信号解码出来。

经过汉宁窗调制和13位barker码编码后的信号如图3(a)所示,作为发射信号,直接获取未经过钢轨传播的发射端发射的波形直接进行解码,保证该信号解码过后得到的编码序列和汉宁窗调制信号的完整性,与载波信号相乘后得到信号图如图3(b)所示,再进入滤波器滤除其中的高频信号,将编码序列和汉宁窗调制信号 $b[k]$ 解码出来,如图3(c)所示。

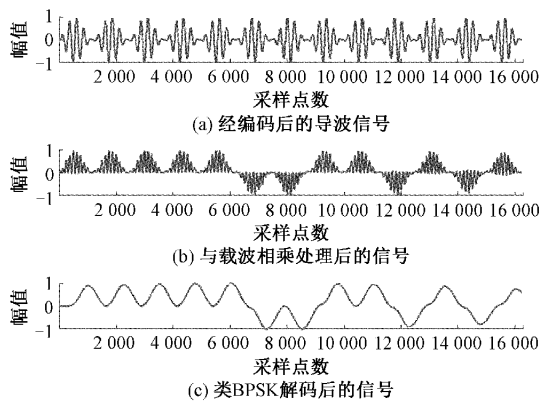


图3 类BPSK解码后信号

### 2.3 解码后相关处理

信号在经过巴克码和汉宁窗调制之后,具有很好的自相关特性,即可以表明具有很好的抗干扰特性,可以使有效信号更容易提取,使得解码的输入信号具有更好的信噪比,从而提高了系统抗干扰能力,以及良好的抗衰减特性。

发射信号在经过解码过后得到是编码序列和汉宁窗调制信号 $b[k]$ ,同理接收信号经过解码过后得到的信号中也包括编码序列和汉宁窗调制信号的信息 $t[k]$ ,为了验证接收到的信号是否与发射信号的编码序列和汉宁窗相一致,将接收信号解码过后的信号与发射信号解码过后的信号进行相关运算,相关表达式可表示为:

$$R_{tt}(k) = \int_{-\infty}^{\infty} b^*(k' - k)t(k')dk' \quad (13)$$

其中, $k$ 为参变量, $k'$ 为积分变量, $b^*(k)$ 为原函数作复数共轭,第一个函数依次作复共轭和平移后与第二个函数相乘的无穷积分。

## 3 实验验证

实验形式按照1.2节中描述的实验平台设计,采用一发一收的工作模式。通过观察经过钢轨传播的波形,若导波经过裂纹,其能量发生衰减、波形模态发生变化,接收端可观察信号波形幅值减小,以及信号会发生畸变,若信号发生畸变,则接收端信号与激励信号的互相关系数会发生明

显降低,文中实验中以不同算法处理信号后的互相关峰值作为参考,并进行信号识别度对比。

实验平台布置如图4,选用3个200 kHz的压电陶瓷片作为实验的一组探头,将这一组探头固定在钢轨轨底处,两个探头间距10 cm,其中中间作为发射导波的激励装置,两侧均作为接收钢轨中导波的接收装置,左侧探头和发射探头之间存在人工伤损,右侧探头和发射探头间无伤损作为对照组。

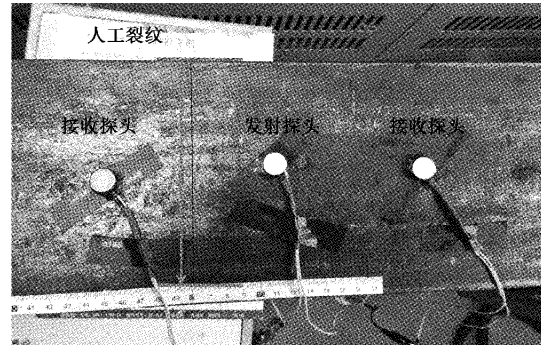


图4 检测探头与人工伤损相对位置

如图5所示,对未进行barker码编码直接用汉宁窗调制信号作为发射信号时接收到的原始信号,进行互相关处理,截取了处理后的信号,记为 $S_0$ ,图中显示为经过人工伤损的红色虚线波形,和无人工伤损的蓝色实线波形,图中无伤损波形峰峰值 $V_{pnd}$ 为180 305.1,经过人工伤损后的波形峰峰值 $V_{pd}$ 为92 456.2,无伤损信号和经过伤损信号峰峰值之比为1.95。

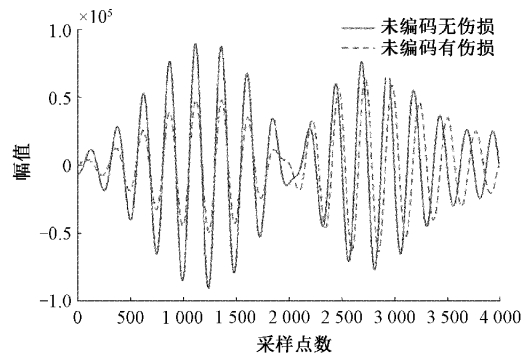


图5 未编码有无伤损间波形对比图

为衡量类BPSK解码对导波信号增强的效果,本文先利用barker码编码-匹配滤波解码对同样的缺陷进行检测,并进行编解码处理,如图6所示,对进行barker码编码作为发射信号时接收到的信号并进行匹配滤波解码后的信号,进行互相关处理,截取了处理后的信号,记为 $S_1$ ,图中无伤损波形峰峰值 $V_{pnd}$ 为868 363,经过人工伤损后的波形峰峰值 $V_{pd}$ 为346 143,无伤损信号和经过伤损信号峰峰值之比为2.51。

经过barker码编码后的信号在经过匹配滤波解码后,整体信号峰值相较于未编码信号幅值为未编码信号的 $N$

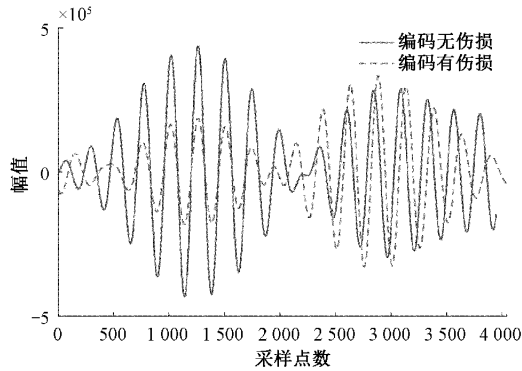


图 6 barker 码-脉冲压缩解码有无伤损对比图

倍,可使得发射的超声信号可以携带更多能量,提高信号平均功率,从而提高有效信号的信噪比,但在针对裂纹信号的识别上,相较于未编码的原始信号,无伤损信号和经过伤损信号峰峰值之比相差并不明显。

经过类 BPSK 解码并经过相关处理后,如图 7 所示截取了进行编码作为发射信号时接收到的信号并进行类 BPSK 解码后的信号,记为  $S_2$ ,图中显示为经过人工伤损的虚线波形,和无人工伤损的实线波形,图中无伤损波形峰峰值  $V_{pnd}$  为 75 202. 520,经过人工伤损后的波形峰峰值  $V_{pd}$  为 12 562. 196,无伤损信号和经过伤损信号峰峰值之比为 5. 986 4。

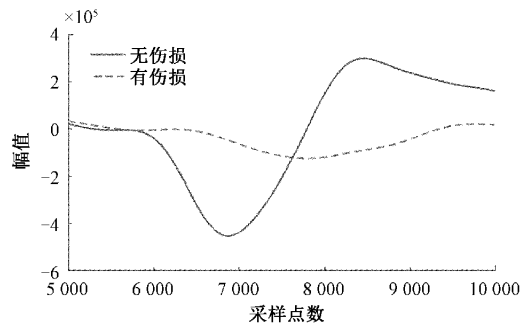


图 7 barker 码-类 BPSK 解码有无伤损对比图

表 2 列出了上述 3 种信号中缺陷信号峰峰值、无缺陷对比信号峰峰值以及缺陷信号和无缺陷信号的峰峰值之比。

表 2 四种信号峰峰值对比表

	$S_0$	$S_1$	$S_2$
$V_{pnd}$	180 305. 1	868 363	75 202. 520
$V_{pd}$	92 456. 2	346 143	12 562. 196
$V_{pnd}/V_{pd}$	1. 95	2. 51	5. 986 4

为确保实验结果具有较好的重复性,针对上述 6 mm 人工裂纹,作一组重复性实验,为尽可能保证实验条件一致,取相同人工裂纹的钢轨,将检测探头安装在相同位置处,做 3 组重复实验,其他实验条件均保持不变,去除因实

验操作导致误差的实验数据,采用同信号  $S_2$  的信号处理方法进行处理,取其中两组实验结果进行对比,如图 8 和 9 所示,可以观察到用 barker 码编码-类 BPSK 的解码方式进行编解码处理的实验结果,其中图中分别是在无伤损时的重复对比图和 6 mm 人工伤损下检测的重复实验对比,从实验结果上可以看出,无论在波形还是波形幅值上,实验结果还是具有较好的重复性。

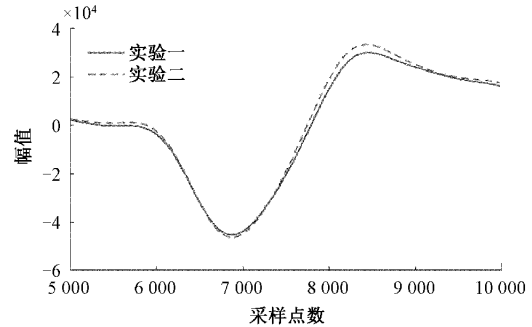


图 8 barker 码-类 BPSK 解码无伤损重复对比图

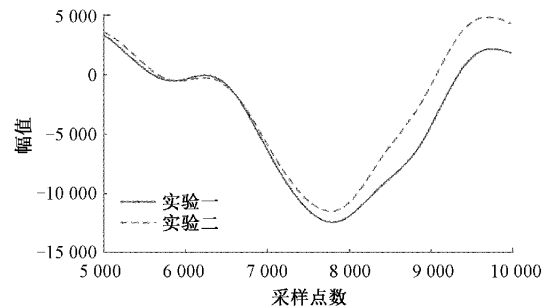


图 9 barker 码-类 BPSK 解码有伤损重复对比图

## 4 结 论

目前基于超声导波的钢轨小裂纹检测下,信号本身相对微弱,针对细小裂纹难以识别,本文将 barker 码作为编码方式,并用类 BPSK 作为解码方式,利用到导波检测钢轨小裂纹的信号处理中,并通过实验将对钢轨轨底上深度 6 mm 宽度 0. 5 mm 的人工裂纹进行验证。实验中,分别用未经过任何信号处理的原始收发导波信号和经过 barker 码-匹配滤波编解码处理的导波信号与实验方法进行对比,结果表明,利用 barker 码-类 BPSK 编解码处理的导波信号在处理钢轨轨底小裂纹的识别上有着明显的增强作用,能够为以后的导波钢轨小裂纹检测提供支持。

## 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): 78-97.
- [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): 11-25, DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J1804527.
- [3] 范振中. 铁路道岔尖轨及长心轨导波检测技术研究

- 究[D].北京:中国铁道科学研究院,2016.
- [4] 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):1666-1684.
- [5] 卢超,刘芮辰,常俊杰.钢轨垂直振动模态的导波频散曲线、波结构及应用[J].振动工程学报,2014,27(4):598-604,DOI:10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2014.04.014.
- [6] 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.
- [7] 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):11050-11062.
- [8] SONG X, TA D, WANG W. A base-sequence-modulated golay code improves the excitation and measurement of ultrasonic guided waves in long bones[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2012, 59(11):2580-2583.
- [9] 敬人可,李建增,周海林.超声无损检测技术的研究进展[J].国外电子测量技术,2012,31(7):28-30,34,DOI:10.19652/j.cnki.femt.2012.07.008.
- [10] LEI X, ZHAO H, GAO S. Barker code in TCD ultrasound systems to improve the sensitivity of emboli detection[J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 2009, 35(1):94-101.
- [11] 田黎育,刘斌.基于DMTD多普勒补偿的互补码脉冲压缩[J].北京理工大学学报,2013,33(1):105-110,DOI:10.15918/j.tbit1001-0645.2013.01.014.
- [12] 张佳凯.超声导波在杆件中传播时的频散特性[J].工程与建设,2020,34(6):1027-1030.
- [13] 许西宁,郭保青,余祖俊,等.半解析有限元法求解钢轨中超声导波频散曲线[J].仪器仪表学报,2014,35(10):2392-2398.
- [14] MALO S, FATERI S, LIVADAS M, et al. Wave mode discrimination of coded ultrasonic guided waves using two-dimensional compressed pulse analysis[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2017, PP(7):1-1.
- [15] 周盛,王晓春,计建军,等. Barker编码激励在眼科高频超声成像中的应用研究[J].中国生物医学工程学报,2012,31(5):8.
- [16] LIN J, HUA J, ZENG L, et al. Excitation waveform design for lamb wave pulse compression[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2015, 63(1):165.
- [17] 刘修扬.超声导波非线性系数检测系统设计[D].北京交通大学,2018.

#### 作者简介

周文涛,硕士研究生,主要研究方向为超声导波断轨检测。

E-mail:weihaizhouwentao@163.com