

NLFM-Barker 编码激励超声导波的 钢轨缺陷检测方法研究*

魏小源^{1,2} 戴晶¹ 井晶¹ 杨晓辉¹ 张雅文¹

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院 兰州 730050; 2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室 兰州 730050)

摘要:针对超声导波进行钢轨缺陷检测时回波信噪比低、高旁瓣及宽主瓣等问题,提出了一种基于非线性调频(NLFM)-Barker 编码激励的超声导波检测方法。首先,用 Barker 码为基础编码,分别与正弦信号、线性调频(LFM)信号与 NLFM 信号相复合。其次,通过仿真对比分析上述 3 种复合编码信号的时域、频域与脉冲压缩特性。仿真结果表明,通过加权匹配滤波后,NLFM-Barker 的脉冲压缩信号在 -6 dB 处主瓣宽度(main-lobe width, MLW)最窄且为 9.23 μs 。最后,为了进一步验证所提复合编码激励的有效性,在 2 000 mm 长 CHN60 型钢轨上通过粘贴不同大小质量块来模拟缺陷进行实验。实验结果表明,当钢轨完好时,NLFM-Barker 信号主瓣宽度较传统的 Sin-Barker 缩短了 5.9% 且峰值旁瓣水平(peak-sidelobe level, PSL)降低了 2.161 4 dB;当钢轨腰部存在缺陷且采用 NLFM-Barker 编码激励时,接收超声导波信号在不同缺陷之间能量变化更为明显。综上所述,该研究可为钢轨腰部缺陷检测与定量分析提供了一种可靠有效的解决方案。

关键词: 超声导波; NLFM 信号; Barker 编码; 钢轨缺陷检测; 脉冲压缩

中图分类号: TB551; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Research on rail defect detection method of NLFM-Barker encoding excited ultrasonic guided wave

Wei Xiaoyuan^{1,2} Dai Jing¹ Jing Jing¹ Yang Xiaohui¹ Zhang Yawen¹

(1. School of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Gansu Key Laboratory of Advanced Industrial Process Control, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aiming at the problems such as low echo signal-to-noise ratio, high sidelobes, and wide main lobes, an ultrasonic guided wave detection method based on Nonlinear Frequency Modulation (NLFM)-Barker coding excitation is proposed. Firstly, Barker code is chosen as the base encoding, which is then combined with sinusoidal signals, line frequency modulation (LFM) signals, and NLFM signals, respectively. Secondly, the time-domain, frequency-domain, and pulse compression characteristics of the three composite coded signals are analyzed through simulations. The simulation results show that after weighted matching filtering, the NLFM-Barker pulse compression signal has the narrowest main lobe width, which is 9.23 μs at -6 dB. Finally, to further verify the effectiveness of the proposed composite coding excitation, defects are simulated by attaching mass blocks of different sizes to a 2 000 mm long CHN60 rail. The experimental results show that when the rail is intact, the main lobe width of the NLFM-Barker signal is reduced by 5.9%, and the peak-sidelobe level (PSL) is decreased by 2.161 4 dB compared to the traditional Sin-Barker signal. When defects are present in the rail web and NLFM-Barker coded excitation is applied, the energy variation of the received ultrasonic guided wave signal becomes more distinct across different defect sizes. To sum up, this study provides a reliable and effective solution for rail web defect detection and quantitative analysis.

Keywords: ultrasonic guided wave; NLFM signal; Barker encoding; rail defect detection; pulse compression

0 引言

钢轨是高速铁路系统中至关重要的组成部分,其质量直接影响列车的平稳运行和行车安全^[1-3]。然而,由于我国幅员辽阔,各地区的工作环境差异较大,钢轨在出厂时难以完全适应不同环境的要求。尤其在复杂恶劣的条件下,随着服役时间的增加钢轨可能会出现生锈、裂纹等问题,进而对列车安全运行构成威胁,因此,对于钢轨结构健康的评估对于列车的安全运行至关重要。

超声导波因其具有单点激励、检测距离长、检测效率高优点,并且可以覆盖整个待测物的横截面,广泛用于各种结构的健康监测中^[4-6]。但由于超声导波在长距离钢轨中传播时受超声导波频散和多模态特性以及环境因素等影响,使得超声导波信号信噪比低且特征复杂,进而导致回波信号淹没在环境噪声中。此外,传统超声检测系统由于受压电超声换能器发射功率的限制,接收导波信号信噪比提升受限。为了解决上述问题,编码激励结合脉冲压缩技术是一种可行的解决方案,Hernandez 等^[7]将 Kasami 序列编码激励技术和超声导波技术结合到钢轨断裂监测系统中,从而提高了接收信号的信噪比和距离分辨率。黄祺凯等^[8]通过基于 Barker 码脉冲压缩技术的 Lamb 波对预制裂纹的厚钢板进行检测,结果表明信噪比相对于传统超声检测系统提升了 9.69 dB,周文涛等^[9]将 Barker 码作为编码序列,利用类二进制相移键控(binary phase shift keying, BPSK)作为解码,在处理钢轨轨底裂纹识别上与经过 Barker 码-匹配滤波编解码处理的导波信号在钢轨小裂纹的识别上具有明显的增强作用。

但是任意的编码激励都有其优势,诸如 Barker 码与格雷码(Golay)在应用于编码激励时,与线性调频(linear frequency modulation, LFM)信号相比降低了时间分辨率^[10]。孟凌霄等^[11]在使用脉冲压缩技术后,LFM 信号激励的信噪比最高达到了 23.9 dB,采用 3×13 位组合 Barker 码时,脉压信号的主瓣宽度为 28.8 μs,分辨率最高,但信噪比较低。

复合编码激励则能保留不同编码的优点,基于复合编码激励的超声检测系统在发射端常常采用 Barker 码、Golay 码等经过脉冲压缩后具有较低旁瓣水平的二进制序列进行相位编码,并以 LFM 信号与非线性调频(nonlinear frequency modulation, NLFM)信号作为载波^[12]。进行复合编码激励与脉冲压缩后的超声导波回波信号具有较低的峰值旁瓣水平(peak-sidelobe level, PSL)、较高的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)以及较低的主瓣宽度(main-lobe width, MLW),从而进一步提升检测系统的轴向分辨率。Cheng 等^[13]对高温锻造体进行缺陷检测,采用了 LFM 信号、Barker 码信号和组合 Barker

码信号 3 种不同的激励方式进行激励电磁超声换能器,研究发现脉冲压缩与组合 Barker 码激发的信噪比可以提高 8.5 dB。张佳莹等^[14]将幅度加权的 LFM 信号与 Barker 码信号进行复合,研究发现在相同带宽下与 LFM 信号、传统窄脉冲和 Barker 码信号激励相比,其 MLW 和 PSL 得到了有效降低。Yang 等^[15]将 3 位的 Barker 码与 4 位的正交互补 Golay 码进行复合并在不同程度断裂程度的钢轨上进行实验,得到了较 Barker 与 Golay 码激励回波振幅差提升了 10 dB 的结果,更有利于钢轨缺陷检测。

在超声检测中,Golay 码虽性能优异,但需双发发射,而单次发射的 Barker 码则表现出更好的综合性能。因此,针对基于超声导波的钢轨缺陷检测,本文选择 Barker 码作为基础编码,结合正弦波、LFM 和 NLFM 信号进行复合编码,分析这 3 种信号分别对钢轨缺陷的敏感度差异。仿真结果表明,NLFM-Barker 信号频谱更宽,脉冲压缩后在 -6 dB 处拥有最窄的 MLW。此外,通过在 CHN60 型号钢轨上附着质量块模拟缺陷进行实验,验证了 NLFM-Barker 信号在检测钢轨腰部缺陷时具备更强的灵敏度及抗干扰能力,并在时频域随着逐渐变大的模拟缺陷表现出了一定的规律性,在钢轨缺陷的检测与定量方面具备参考意义。

1 超声编码激励原理

1.1 相位编码信号

相位编码广泛用于雷达定位和医学成像^[16]。其中 Barker 码具有良好的自相关性和旁瓣水平,能够很好的提升回波信号的 SNR,从而广泛用于超声检测系统之中^[17]。Barker 序列最长为 13 位,其对应的二进制表示与其 PSL 对比如图 1 所示。

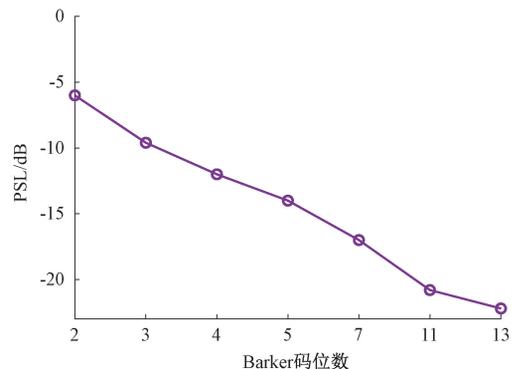


图 1 Barker 码 PSL 随位数变化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Barker code PSL changing with bits

由图 1 可知,随着 Barker 位数的增加,其旁瓣水平也就越低,因此本文将采用 13 位的 Barker 码作为调相编码,其中过采样的 Barker 码表达式如下:

$$s_{Barker}(t) = \left\{ \sum_{k=0}^{Q-1} c_k \delta(t - kT_p) \right\}, (0 \leq t \leq T_p) \quad (1)$$

式中： $\{c_k = \pm 1, k = 0, 1, 2, \dots, Q - 1\}$ 表示 Barker 的二进制序列； T_p 为单位码片时间； Q 表示 Barker 信号的码长。

1.2 载波信号

传统的 Barker 码载波信号为正弦信号，为了检验 NLFM-Barker 信号的性能，本文采用单周期正弦信号、LFM 信号与 NLFM 信号与 13 位 Barker 码信号进行复合编码，并进行对比，其中单周期的正弦信号不再赘述。

1) LFM 信号生成方法

LFM 信号具有很好的自相关特性，其表达式比较固定^[18-19]，通用性好，因此被广泛运用到超声编码激励中作为调频信号。其表达式如下：

$$S_{LFM}(t) = M \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp[i\theta(t)] = M \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp\left[j2\pi\left(\left(f_0 - \frac{B}{2}\right)t + \frac{Bt^2}{2T_p}\right)\right] \quad (0 \leq t \leq T_p) \quad (2)$$

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_p \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中： M 为信号幅度； B 为带宽； f_0 为中心频率； T_p 为时宽； $\theta(t)$ 为 LFM 时域相位函数； $\text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right)$ 为矩形脉冲。

图 2 所示为中心频率 f_0 为 35 kHz，带宽 B 为 70 kHz，时宽为 371 μs 的 LFM 时域与自相关结果图示。

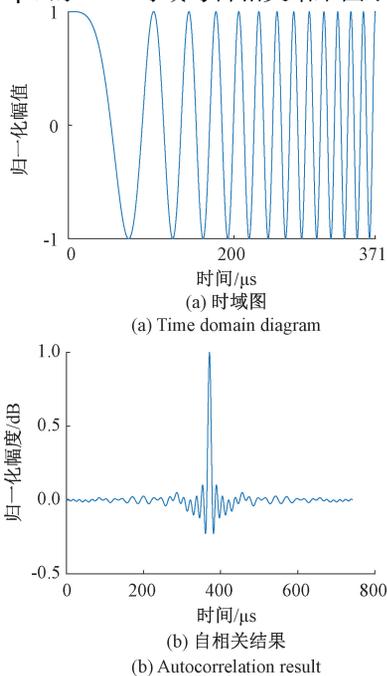


图 2 LFM 信号的时域图与频域图

Fig. 2 Time domain and autocorrelation result of LFM signal

2) NLFM 信号生成方法

为降低旁瓣水平的同时保证信噪比，阮黎婷等^[20]提出了 NLFM 信号，构造 NLFM 信号的方法很多，有窗函数反求法、S 曲线设计法、动态优选法等，本文主要利用窗函数反求法进行 NLFM 的设计。

窗函数反求法的 NLFM 设计的基础是首先确定需要窗函数，如 Hamming 窗或 Blackman 窗作为功率谱 $W(f)$ ，使幅度谱的平方等于 $W(f)$ ：

$$A^2(f) = W(f) \quad (4)$$

随后，对 $W(f)$ 进行积分得到群时延函数：

$$T(f) = K \int_{-B/2}^f W(v) dv \quad (5)$$

其中， K 为常系数，公式如下：

$$K = \frac{T_p}{\int_{-B/2}^{B/2} W(v) dv} \quad (6)$$

式中： T_p 为时宽； B 为带宽。得到群时延函数 $T(f)$ 后，对其求反函数得到调频函数：

$$f(t) = T^{-1}(f) \quad (7)$$

进一步对调频函数进行积分，得到相位函数：

$$\varphi(t) = 2\pi \int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau \quad (8)$$

最后得到 NLFM 信号：

$$s_{NLFM}(t) = \exp[j\varphi(t)] \quad (9)$$

根据式 (4) ~ (9) 可知，求解以 Hamming 窗为例的 NLFM 信号，易得其函数表达式为：

$$W(f) = 0.54 + 0.46\cos(2\pi f/B) \quad (10)$$

$$K = 0.54T/B \quad (11)$$

由此可得群时延函数为：

$$T(f) = (T/B)f + (0.426T/\pi) \sin(2\pi f/B) \quad (-B/2 \leq f \leq B/2) \quad (12)$$

令时宽 T 为 742 μs ，带宽 B 为 70 kHz，图 3 所示为群时延函数、调频函数和 NLFM 的时域图以及自相关结果。

1.3 复合编码与脉冲压缩原理

1) 复合编码原理

为扩展信号的频谱，从而更有效地检测不同频带敏感的缺陷，复合编码技术是一种行之有效的解决方案。复合编码的原理是将不同类型的编码信号进行卷积处理，复合的原理如图 4 所示。

复合的方式为两信号进行卷积，其公式如下：

$$s(t) = s_{Barker}(t) * s_{\text{基础序列}}(t) = \left\{ \sum_{k=0}^{Q-1} c_k \delta(t - kT_p) \right\} * s_{\text{基础序列}}(t) \quad (0 \leq t \leq T_p) \quad (13)$$

式中：“*”代表卷积。这种复合编码方式能够在不增加系统复杂度的情况下，增强缺陷检测的灵敏度。

2) 脉冲压缩原理

在超声检测系统中，信号经过复合编码发射后，通常

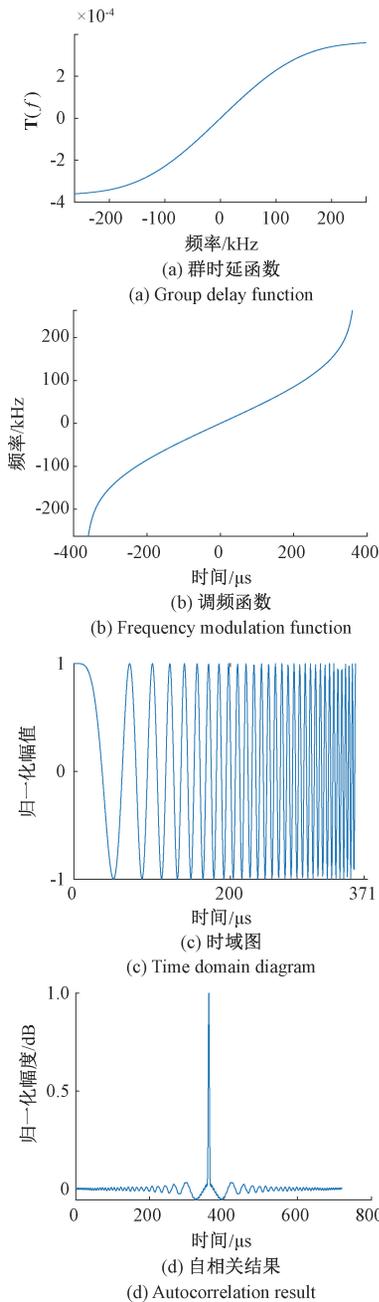


图 3 以 Hamming 窗为例的 NLFM 信号

Fig. 3 NLFM signal with Hamming window as an example

对接收信号进行脉冲压缩,从而恢复轴向分辨率与抑制旁瓣。脉冲压缩方法包含匹配滤波、加权匹配滤波器、逆滤波器与失配滤波。其中失配滤波器的原理为在匹配滤波的结果上进行加窗处理,但对于 Barker 编码激励来说,不仅不能使旁瓣降低,还会使信号性能变差^[21],因此对于本文所采用的复合编码信号来说,想进一步对旁瓣进行抑制时,不可以采用失配滤波的方法。作为最经典的脉冲压缩方法之一,匹配滤波在所有线性滤波器中有最高的信噪比^[22],因此本文采用了加权匹配滤波器进行脉

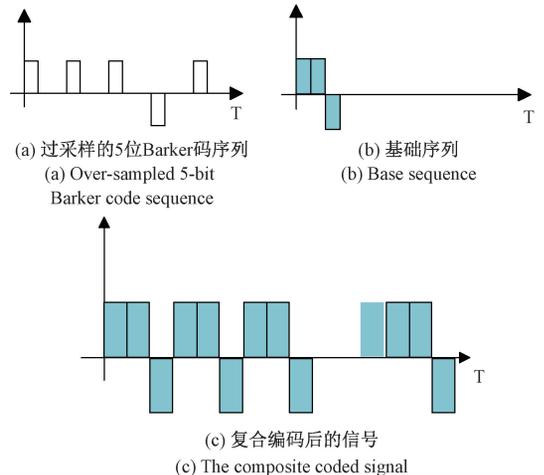


图 4 复合编码示意图

Fig. 4 Schematic diagram of composite coding

冲压缩,并与匹配滤波进行对比。

匹配滤波的原理很简单,在不考虑超声换能器响应与信道对发射信号的干扰,匹配滤波器的冲激响应即为原始发射信号的时间反转^[23],如式(14)所示。

$$h_{match}(t) = ks(t_0 - t) \quad (14)$$

式中: $s(t)$ 为原始信号; t_0 为信号的时宽; k 为常数,通常取 1。

而复合编码信号,通常 $s(t)$ 由两部分卷积组成,即码元序列过采样信号以及载波信号,因此对其进行匹配滤波时也需要对两部分分别进行匹配滤波。以 LFM-Barker 信号进行匹配滤波的仿真如图 5 所示。

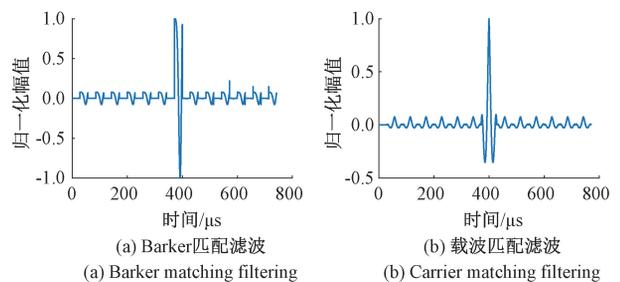


图 5 LFM-Barker 信号匹配滤波

Fig. 5 Matching filtering of LFM-Barker signal

为了进一步降低旁瓣水平,本文采用的加权匹配滤波器能在保持 MLW 不变的情况下获得尽可能低的旁瓣水平,其原理是在匹配滤波器的基础上利用幅度加权网络进行失配滤波,如式(15)所示。

$$p(t) = h_{match}(t) \cdot h(t) \quad (15)$$

式中: $h(t)$ 为幅度加权网络的旁瓣抑制滤波器。

$$h(t) = \sum_{k=6}^{k=6} \beta_k \delta(t - 2kT_p) \quad (16)$$

式中: $\beta_k(k = -6, -5, \dots, 0, \dots, 5, 6)$ 为加权系数。由于相位编码信号非周期自相关波形是以主瓣为对称轴左右对称的,故加权系数也左右对称,如式(17)所示。

$$\beta_k = \beta_{-k}(k = -6, -5, \dots, 0, \dots, 5, 6) \quad (17)$$

计算方法如下所述^[24]。复合编码信号码长为 N 时,其匹配滤波函数码长为 $2N-1$,故旁瓣抑制滤波器有 $2N-1$ 个延迟时间为 T_p 的延迟节, T_p 也就是单位载波的时宽。复合编码信号匹配滤波函数 S 、旁瓣抑制加权系数 h ,期望输出 F 如式(18)~(20)所示。

$$S = [s_1, s_2, \dots, s_N, \dots, s_{2N-2}, s_{2N-1}] \quad (18)$$

$$h = (\beta_{-(N-1)}, \beta_{-(N-2)}, \dots, \beta_0, \dots, \beta_{(N-2)}, \beta_{(N-1)})^T \quad (19)$$

$$F = (0, 0, \dots, 0, s_N, 0, \dots, 0)^T \quad (20)$$

构造大小为 $2N-1$ 的零矩阵 S_0 并对其初始化,滤波器输出表达式为 $F = S_0 h$,可得 $h = S_0^{-1} F$,以 13 位 Barker 序列为例,其零矩阵 S_0 如式(21)所示。

$$S_0 = \begin{pmatrix} S_N & \dots & S_{2N-1} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_1 & \dots & S_N & \dots & S_{2N-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & S_1 & \dots & S_N \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$h = S_0^{-1} F = \begin{pmatrix} 13 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \dots & 0 & 13 & 0 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 13 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ \dots \\ 13 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (22)$$

结合式(20)~(22)可获得加权系数矩阵,得到的结果再代入式(15),从而实现加权匹配滤波,以 LFM-Barker 信号为例,结果如图 6 所示。

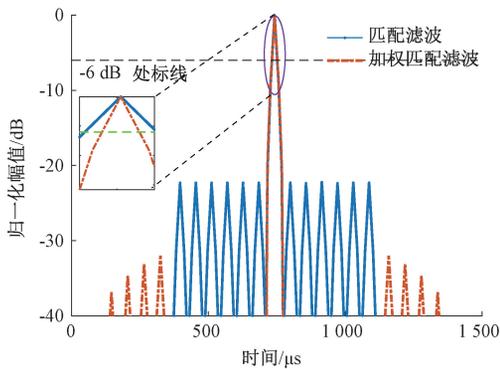


图 6 两种脉冲压缩方式 PSL 对比

Fig. 6 Comparison of two pulse compression methods PSL

根据图 6 结果可知,经过匹配滤波之后的信号在 -6 dB 处 MLW 为 $20.022 \mu s$,旁瓣水平为 -22.198 dB;而经过加权匹配滤波后的信号在 -6 dB 处 MLW 为

$19.9636 \mu s$,旁瓣水平为 -31.9898 dB。因此可以得出,相对于匹配滤波来说,经过加权匹配滤波后的信号在保持 MLW 减小的情况下同时获得了旁瓣的较大抑制。

2 复合编码信号仿真结果对比

为了分析 3 种复合编码信号的性能,将 Sin-Barker、LFM-Barker 与 NLFM-Barker 的时域、频域以及脉冲压缩后的特性进行对比分析。其中三者的中心频率均为 35 kHz,时长 T 均为 $371 \mu s$,带宽 B 为 70 kHz,使用的调相编码为 13 位 Barker 码。时域与频域信号如图 7 所示。

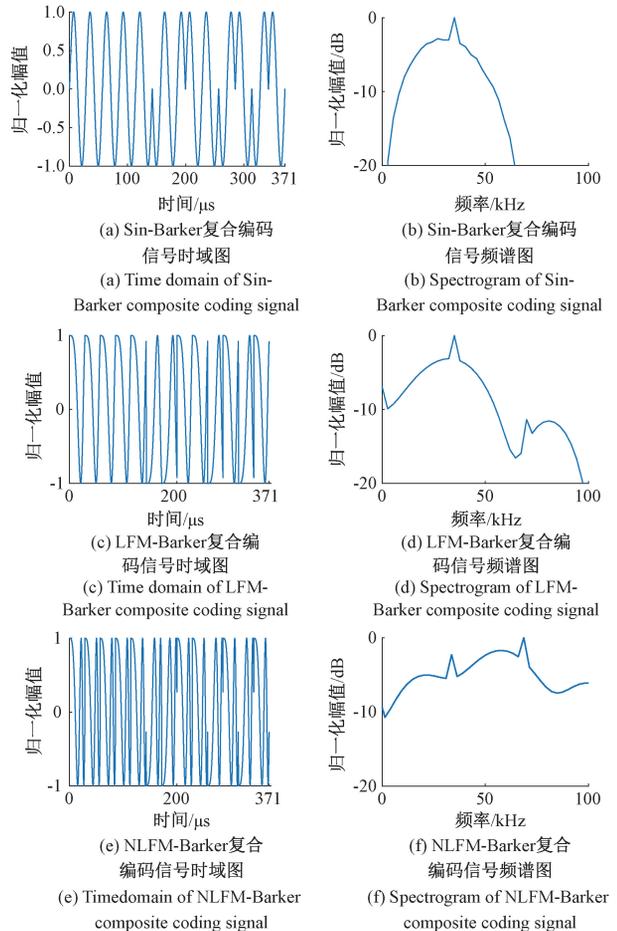


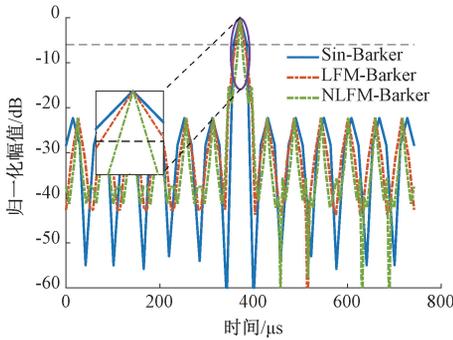
图 7 3 种复合编码信号时域图与频谱图

Fig. 7 Three kinds of composite coded signal time domain diagram and spectrum diagram

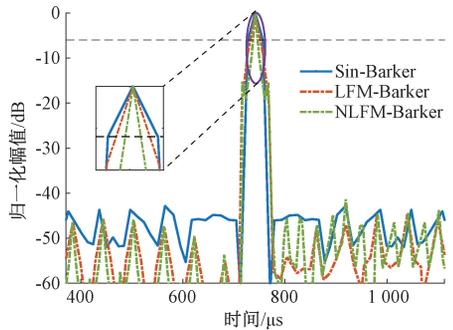
为了验证其在缺陷检测中的优势,本文采用了如 SNR, -6 dB 处 MLW 与 PSL 等评价指标进行判断。对 3 种信号分别进行利用两种脉冲压缩方式进行脉冲压缩,随后利用式(23)进行处理之后得到 PSL 结果如图 8 所示。

$$PSL = 20\lg\left(\frac{A_1(t)}{\max(A_1(t))}\right) \quad (23)$$

式中: $A_1(t)$ 为脉冲压缩结果的时域信号。



(a) 匹配滤波下三种信号的PSL对比
(a) PSL comparison diagram of the three signals under matching filter



(b) 加权匹配滤波下三种信号的PSL对比
(b) PSL comparison diagram of the three signals under weighted matching filter

图 8 3 种复合编码信号在两种脉冲压缩方式下 PSL 对比图

Fig. 8 PSL comparison diagram of three composite coded signals under two pulse compression modes

由图 8 可知,在两种脉冲压缩方式下,3 种信号的 PSL 都比较接近,但相对于匹配滤波,同种信号在经过加权匹配滤波之后 PSL 能进一步降低 19.079 4 dB。在 -6 dB 处 WLM 上,NLFM-Barker 在两种脉冲压缩方式下都是最窄的,根据图 6 结果可知,经过加权匹配滤波后主瓣还会进一步降低。经过测量,在加权匹配滤波下 NLFM-Barker 的 -6 dB 处 WLM 为 9.23 μs,相对于经典的 Sin-Barker 信号在经过匹配滤波后的 -6 dB 处 WLM 降低了 19.886 μs。

随后对 3 种信号在不同情况下 SNR 进行对比,本文采用的 SNR 的计算方法如下^[25]:

$$SNR = 20\lg\left(\frac{|P_e|}{\sigma_{r(t)}}\right) \quad (24)$$

式中: P_e 是回波的峰值幅度; σ 是信号 $r(t)$ 的标准偏差。根据式(24)计算每种情况下信号的信噪比,数据如表 1 所示。

表 1 仿真下 3 种信号在两种脉冲压缩下的 SNR

Table 1 The SNR of three kinds of signals under two kinds of pulse compression under simulation (dB)

信号类型	原始信号	匹配滤波	加权匹配滤波后
Sin-Barker	65.154	86.532 2	95.092 9
LFM-Barker	75.424 1	99.170 6	107.653 1
NLFM-Barker	69.084	94.718 3	103.219 1

在进行横向对比时,可以看出,在提升信噪比方面,相对于 3 种信号的原始信号来说,进行匹配滤波和加权匹配滤波能够大大的提升原始信号的信噪比,从而使得信号在恶劣环境中也能准确有效的进行缺陷检测。而进行纵向对比时,可以发现 LFM-Barker 在 3 种状态下的信噪比都是最高,其次是 NLFM-Barker,这两种复合编码都比原始的以正弦信号为载波的 Sin-Barker 的信噪比要强,证明了本文所采用的复合编码信号的在恶劣环境中的优越性。

3 实验验证

3.1 实验平台介绍

图 9 所示为实验室所采用的超声检测系统,系统由信号发生器 (AFG1062, Tektronix)、功率放大器 (UTAWG, TECLAB)、示波器 (MD034, Tektronix) 与一对压电超声换能器组成。

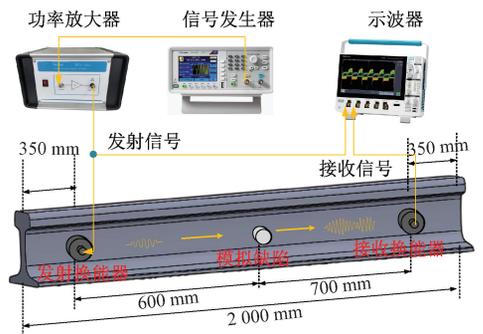


图 9 超声检测系统示意图

Fig. 9 Schematic diagram of ultrasonic detection system

模拟缺陷需要可以被选择性的加入、去除与移动,因此不能通过切割等手段进行模拟真实缺陷,在这种条件下,国内外学成通常采用耦合质量块的方法模拟缺陷^[26],缺陷回波产生的根本原理是缺陷处存在的声阻抗突变,因此依靠耦合质量块的方法也能起到有效模拟缺陷的效果。

其中模拟缺陷的质量块由 3 种高度相等但是直径变化的铝制圆柱体构成,质量块耦合位置固定。物理信息如图 10 所示。

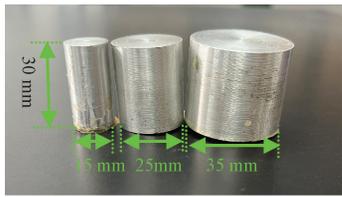


图 10 不同模拟缺陷的物理信息

Fig. 10 Physical information of different simulated defects

3.2 抗噪性分析

首先,对无缺陷情况下的接收信号进行分析,以评估信号的性能是否符合设计预期。图 11 所示为 3 种激励方式 Sin-Barker、LFM-Barker 和 NLFM-Barker 信号时接收信号的时域图与最后的加权匹配滤波的脉冲压缩示意图。

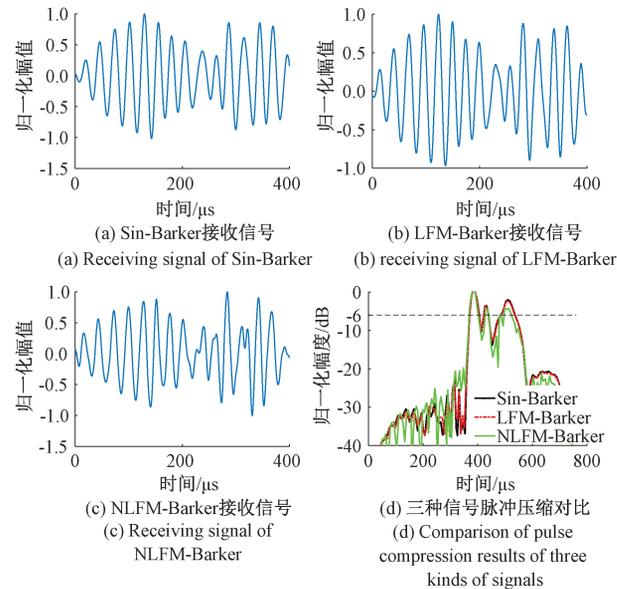


图 11 3 种发射信号在无缺陷状态下接收信号时域图与脉冲压缩结果

Fig. 11 The time domain diagram and pulse compression results of the three transmitted signals received without defect

由图 11 可知, Sin-Barker 信号的 MLW 最大,为 $73.1178 \mu\text{s}$; LFM-Barker 信号的 MLW 居中,为 $71.8301 \mu\text{s}$; 而 NLFM-Barker 信号的 MLW 最小,仅为 $69.0662 \mu\text{s}$ 。由此可以得出, NLFM-Barker 信号在脉冲压缩后的轴向分辨力最佳。

由于实验所用的钢轨长度较短,仅为 2000 mm ,在主瓣旁边的高峰值信号为钢轨中的反射波的互相关结果^[27]。其中 NLFM-Barker 信号的峰值旁瓣最低,为 -4.1616 dB ,较 Sin-Barker 信号和 LFM-Barker 信号分别降低了 2.1614 和 1.8499 dB 。

随后,对接收信号进行抗噪性分析,在 $\text{SNR} = -10 \text{ dB}$

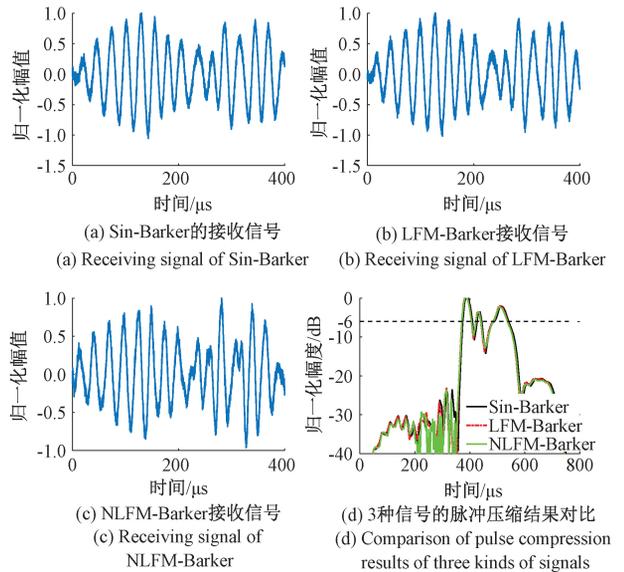


图 12 在 $\text{SNR} = -10 \text{ dB}$ 时 3 种发射信号在无缺陷状态下接收信号时域图与脉冲压缩结果

Fig. 12 Time-domain diagram and pulse compression results of the three transmitted signals under defect-free conditions at $\text{SNR} = -10 \text{ dB}$

的噪声条件下,观察发射信号是否会因为噪声而导致信号脉冲压缩后的结果变坏,如图 12 所示。由图 12 可知,在噪声条件下,3 种信号的 MLW 并未表现出显著的差异, Sin-Barker 信号的 MLW 为 $73.0236 \mu\text{s}$; LFM-Barker 信号的 MLW 为 $71.4218 \mu\text{s}$; 而 NLFM-Barker 信号的 MLW 为 $69.5373 \mu\text{s}$ 。在峰值旁瓣水平上, NLFM-Barker 信号的峰值旁瓣最低,为 -3.58627 dB , Sin-Barker 信号和 LFM-Barker 信号分别为 -3.56916 和 -3.48652 dB 。

为了确定 3 种信号在不同环境下信噪比的变化,使用式 (24) 计算后,得到的数据如表 2 所示。根据表 2 数据分析可得,即便在噪声环境中,3 种信号的 MLW 变化不大,信噪比也维持着不错的水平。因此,3 种信号均在噪声干扰下保持了稳定的 MLW,这对于信号的可靠检测具有重要意义。

表 2 不同情况下 3 种信号的信噪比

Table 2 SNR of three signals under two pulse compression under experimental conditions (dB)

信号类型	原始信号	原始信号进行脉冲压缩	$\text{SNR} = -10 \text{ dB}$ 时进行脉冲压缩
Sin-Barker	75.721 4	97.726 4	87.420 7
LFM-Barker	75.829 0	97.957 4	87.626 2
NLFM-Barker	78.595 2	98.925 9	88.894 3

3.3 缺陷信号分析

由于本文采用了透射检测法进行超声导波的数据采

集,因此无法通过接收信号直接对缺陷进行准确定位。然而,在超声导波的传播过程中,当导波遇到缺陷时,除了发生反射和散射外,还可能出现模式转换,即导波从一种模式转换为另一种模式,同时伴随回波能量的变化。以 NLFM-Barker 信号的接收信号为例,在不同缺陷条件下的接收信号表现有所不同,如图 13 所示。

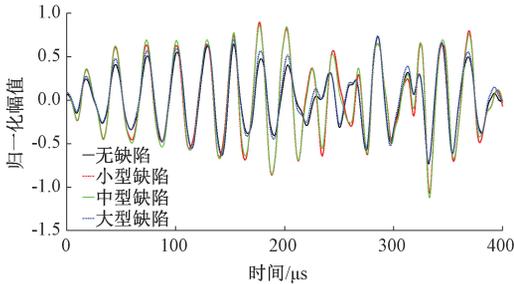


图 13 发射信号为 NLFM-Barker 在不同缺陷作用下接收信号

Fig. 13 The transmitted signals are NLFM-Barker receive signals under the action of different defects

由图 13 可知,随着缺陷的存在,接收信号的幅值显著变化,尤其是在不同大小的缺陷条件下,回波能量的变化更加明显。这种现象表明,通过分析接收信号的能量变化,可以初步判断缺陷的存在及其影响范围,虽然不能进行精确的定位,但能够为缺陷检测提供有力的参考依据。

为了更加直观地展示接收信号振幅之间的差异,本文采用积分法计算每个接收信号的能量,并对其进行归一化处理。归一化后的信号能量能够有效反映各类缺陷对信号的影响,便于比较不同信号在缺陷检测中的效果。具体的能量计算公式^[28]如下:

$$E(i) = \int r_i(t)^2 dt \quad (25)$$

其中, i 取 1~4, 分别代表无缺陷、小缺陷、中缺陷与大缺陷 4 种情况, $r_i(t)$ 代表在第 i 种情况下接收到的接收信号。通过式(25)计算出每个接收信号的能量并进行比较。

为了清晰地对比 3 种信号在 3 种不同缺陷条件下与无缺陷状态下的回波能量差异,本文通过计算每种缺陷接收信号的能量与无缺陷状态接收信号能量的差值,来表征 3 种信号在区分不同缺陷时的能力。由图 14 可知, Sin-Barker 和 LFM-Barker 信号在分辨小型与中型缺陷方面能力相近,但在大型缺陷的检测中, LFM-Barker 信号的能量差值相对较小,不如 Sin-Barker 信号明显。而 NLFM-Barker 信号在所有 3 种缺陷条件下的能量差值都大于或等于其他两种信号,表明其在辨别不同缺陷方面表现出更强的能力。

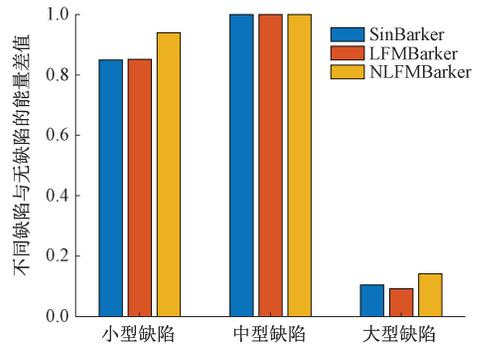


图 14 接收信号在缺陷情况下与无缺陷状态的能量之差

Fig. 14 The energy difference between the receive signal in the defect state and the non-defect state

根据以上分析,可以认为 NLFM-Barker 信号在存在缺陷下的表征能力更强,为了进一步探究 NLFM-Barker 信号具体在不同缺陷下的表现,本文决定采用小波变换的方法,并在时频域进行分析验证。小波变换后的时频域图如图 15 所示。

可以看出,在时频域下, NLFM-Barker 信号的接收信号的加权匹配滤波结果在存在缺陷与无缺陷的情况之间存在区别,与接收信号在能量上的区别一致,在小、中型缺陷区别明显,而在大型缺陷的检测中敏感性则有所降低,在小型缺陷与中型缺陷之间,也无法从肉眼看出差别。

更进一步来说,在无缺陷与大型缺陷的情况下,信号的能量在时间上主要集中在 280~720 μs 之间,在 340 和 580 μs 的时候存在峰值,频率上主要分布在 35 kHz 附近,而在小型与中型缺陷的条件下,信号的能量则相对集中于 280~520 μs 之间,仅存在 340 μs 处的一个峰值。因此可以推断出,在存在小型与中型缺陷时,缺陷会对第 2 个峰值造成一定程度上的削弱,由此可以作为分辨小、中型缺陷与无缺陷之间的判断依据。

然而信号在无缺陷与大型缺陷、小型缺陷与大型缺陷之间的区别并不明显。为了辨别此间的信号差别,分别进行 3 种缺陷条件下与无缺陷时的信号做差,得到结果如图 16 所示。

由图 16 可知,小型缺陷与无缺陷之间的区别主要存在于 313~680 μs 之间,在此时间区间内,两者信号差的峰值位于 40.396 kHz、408.747 9 μs 处,峰值为 0.470 4;中型缺陷与无缺陷之间的区别主要存在于 309~638 μs 之间,在此时间区间内,两者信号差的峰值位于 40.396 kHz、421.446 3 μs 处,峰值为 0.426 25;大型缺陷与无缺陷之间的区别主要存在于 340~625 μs 之间,在此时间区间内,两者信号差的峰值位于 40.396 kHz、437.044 3 μs 处,峰值为 0.082 136,峰值差别如表 3 所示。

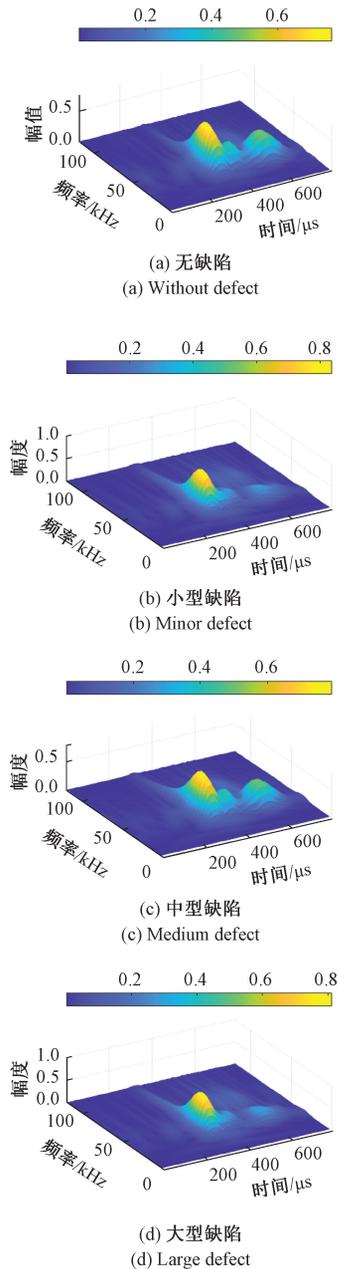


图 15 不同缺陷条件下脉冲压缩后的时频图
Fig. 15 Time-frequency diagram of pulse compression under different defect conditions

表 3 轨腰处时频域不同缺陷大小与无缺陷信号差的峰值差别

Table 3 Peak difference of signal difference in time-frequency domain with different defect size and without defect on rail web

参数	小型缺陷	中型缺陷	大型缺陷
时间/ μs	408.747 9	421.446 3	437.044 3
差的峰值	0.470 4	0.426 25	0.082 136
频率/kHz	40.396	40.396	40.396

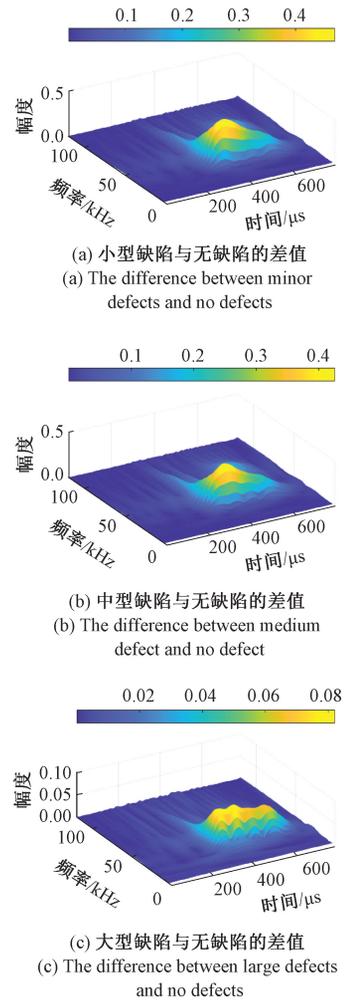


图 16 不同缺陷条件之间差值的时频图
Fig. 16 Time-frequency diagram of the difference between different defect conditions

因此,可以初步推断,在无缺陷、小型缺陷、中型缺陷到大型缺陷的变化过程中,信号差值呈现出一定的规律性。随着缺陷的增大,两信号差值的峰值在频率上相对固定,而在时间上则逐步后移,且差值逐渐减小。这一规律性显著且一致,表明信号差值的变化可作为缺陷程度的量化指标,为缺陷检测提供了可靠的依据。

为了验证 NLFM-Barker 复合编码方法对钢轨不同位置如轨底轨头处缺陷的检测能力,如图 17 所示,将质量块分别粘贴在轨底和轨头处,并采用相同的超声导波激发方式对缺陷进行检测,从而进一步验证本文提出的 NLFM-Barker 复合编码方法的性能。

模拟缺陷分别位于轨头和轨底时,加权匹配滤波后信号差值的时频分析如图 18 和 19 所示,由图 18 和 19 可知,在时频域下相同缺陷条件下轨底与轨头处的差值情况存在显著差异,如表 4 所示。由表 4 可知,随着缺陷增大,轨底与轨头的差值信号峰值先增大后减小,与轨腰

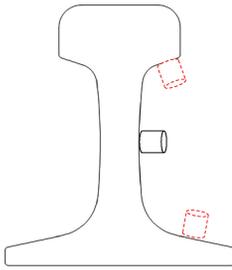
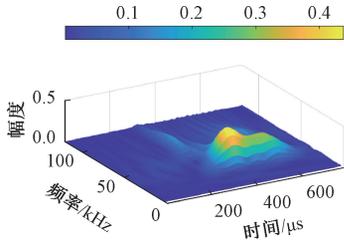


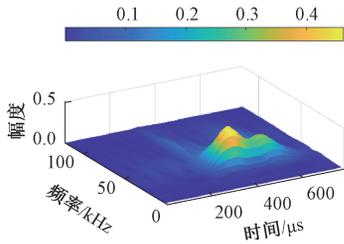
图 17 模拟缺陷位置示意图

Fig. 17 Schematic diagram of simulated defect locations

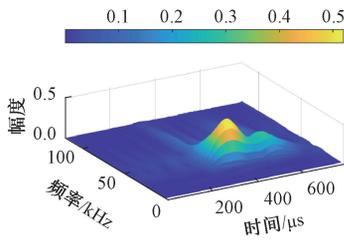
处所呈现的单调增大规律不一致;在轨底与轨头处差值信号在幅度上更强;但差值信号在频率上轨头、轨底与轨腰呈现相同规律,差值信号在 40 kHz 附近。由此推断出缺陷信号与无缺陷信号差值频谱对缺陷位置和大小并不敏感,主要反映是否存在缺陷。



(a) 小型缺陷与无缺陷的差值
(a) The difference between minor defects and no defects



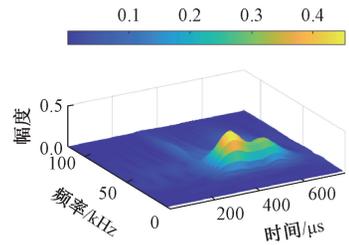
(b) 中型缺陷与无缺陷的差值
(b) The difference between medium defect and no defect



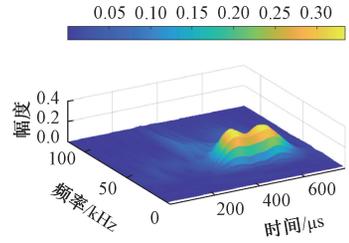
(c) 大型缺陷与无缺陷的差值
(c) The difference between large defects and no defects

图 18 模拟缺陷位于轨头时加权匹配滤波后信号差值的时频图

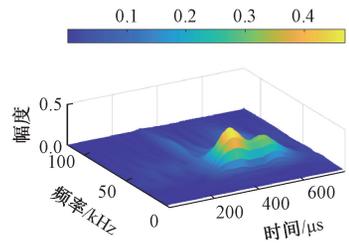
Fig. 18 Time-frequency plot of the signal difference after weighted matched filtering for simulated defects located at the rail head



(a) 小型缺陷与无缺陷的差值
(a) The difference between minor defects and no defects



(b) 中型缺陷与无缺陷的差值
(b) The difference between medium defect and no defect



(c) 大型缺陷与无缺陷的差值
(c) The difference between large defects and no defects

图 19 模拟缺陷位于轨底时加权匹配滤波后信号差值的时频图

Fig. 19 Time-frequency plot of the signal difference after weighted matched filtering for simulated defects located at the rail foot

表 4 轨头与轨底缺陷信号与无缺陷信号时频域下差的峰值对比

Table 4 Peak difference of signal difference in time-frequency domain with different defect size and without defect between the rail foot and rail head

参数	小型缺陷		中型缺陷		大型缺陷	
	轨底	轨头	轨底	轨头	轨底	轨头
时间/ μs	417.4	417.4	426.0	420.6	421.0	415.2
差的峰值	0.466 9	0.438 6	0.334 9	0.461 8	0.470 3	0.520 5
频率/kHz	40.7	40.7	40.7	40.7	40.7	40.7

由表 3 和 4 可知,当钢轨存在缺陷时,无缺陷与有缺陷下差值信号的频谱峰值在 40 kHz 附近。相对于激发频率 35 kHz 增大了 5 kHz 左右,上述现象在已有研究中

有所涉及, 主要与钢轨的自身条件与环境因素有关^[29]。此外, 超声导波信号经过缺陷后会发发生模态转换, 因此大型缺陷的峰值反而最小可以解释为信号经过大型缺陷后, 能量分散至多方向, 探头接收的有效信号幅值降低, 与无损信号差异减小^[30]。

结合上述结论来看, 单一衡量指标无法反映不同位置不同缺陷的变化规律, 针对上述情况, 根据文献[28, 31]与本文数据特性, 联合多个特征参数来对不同位置的缺陷进行检出评价。这些特征参数主要涉及缺陷信号与无缺陷信号的时域信息差、频域的功率差、频域的信息差、无缺陷与存在缺陷信号的差异度, 具体计算如式(26)~(29)所示。

$$\eta = \left| \frac{\max(\sqrt{x^2(t)} + \bar{x}^2(t)) - \max(\sqrt{r^2(t)} + \bar{r}^2(t))}{\max(\sqrt{r^2(t)} + \bar{r}^2(t))} \right| \quad (26)$$

$$\delta = \left| \frac{x^2(\omega) - r^2(\omega)}{r^2(\omega)} \right| \quad (27)$$

$$\lambda = \left| \frac{\max(x(\omega)) - \max(r(\omega))}{\max(r(\omega))} \right| \quad (28)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_N [x_n - r_n]^2}{\sum_N (r_n)^2}} \quad (29)$$

表 5 轨头、轨腰与轨底缺陷信号与无缺陷信号不同特征参数下的差值对比

Table 5 Comparative analysis of differential feature parameters between defect and non-defect signals in rail Head, web, and foot

特征参数	信号时域信息差			信号频域功率差			信号频域信息差			缺陷信号与原信号差异度		
	小型缺陷	中型缺陷	大型缺陷	小型缺陷	中型缺陷	大型缺陷	小型缺陷	中型缺陷	大型缺陷	小型缺陷	中型缺陷	大型缺陷
轨头	0.245 2	0.228 0	0.258 5	0.812 0	0.791 0	0.865 4	1.343 7	1.391 7	1.268 4	0.620 9	0.623 4	0.692 8
轨腰	0.156 4	0.176 4	0.003 5	0.869 6	0.792 9	0.047 3	1.439 9	0.551 2	0.149 7	0.685 3	0.618 2	0.140 6
轨底	0.242 7	0.199 0	0.255 9	0.791 3	0.711 5	0.809 1	1.388 1	0.445 0	1.387 9	0.615 8	0.521 8	0.636 5

4 结 论

本文通过仿真与实验, 对比分析了 Sin-Barker、LFM-Barker 和 NLFM-Barker 3 种复合编码信号在钢轨缺陷检测中的性能。研究表明, NLFM-Barker 信号经加权匹配滤波后, 在-6 dB 信噪比下, 主瓣宽度较传统 Sin-Barker 信号缩短 19.886 μ s, 峰值旁瓣比降低 19.079 4 dB, 显著提升时间分辨率与旁瓣抑制能力。在实际检测中, NLFM-Barker 信号对小、中、大型模拟缺陷的辨别能力最优, 其时频域脉冲压缩结果呈现“缺陷增大时, 最大峰值点频率固定、峰值点右移且幅度衰减”的规律, 从而为缺陷量化提供关键依据。通过轨头、轨腰与轨底区域对比试验表明, NLFM-Barker 信号在轨腰区域检测效能最佳, 3 种特征参数变化与理论分析高度一致; 而在轨头、轨底

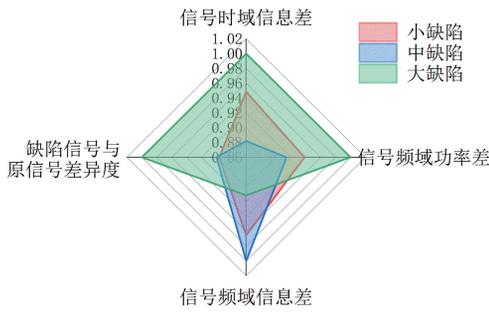
式中: η 代表时域信息差; δ 代表频域的功率差; λ 代表频域的信息差; $RMSD$ 代表利用均方根来反应无缺陷与存在缺陷信号的差异度; $x(t)$ 为缺陷信号的时域信号; $r(t)$ 为无缺陷信号的时域信号; $x(\omega)$ 为缺陷信号的频域信号; $r(\omega)$ 为无缺陷信号的频域信号; N 为信号的长度; x_n 与 r_n 分别为每个点上的缺陷信号与无缺陷信号的值。

依据 NLFM-Barker 信号的接收信号加权匹配滤波结果和式(26)~(29)计算可得, 不同特征参数如表 5 所示, 经过归一化后的参数结果如图 20 所示。根据图 20 可以看出, 轨腰的数据有 3 种特征参数随着缺陷大小的变化下表现出了一定的规律, 即缺陷信号与原信号的差异度、信号频域信息差以及信号频域功率差均是由大到小呈递减趋势变化, 与前文所研究的时频域信号差值峰值变化规律一致; 轨头在信号差异度上表现出了规律性, 随着缺陷的增大差异度也随之增大; 轨底的数据在所提出的特征参数下面均没有表现出规律性。由此可以分析得出, 由于压电超声换能器安装于轨腰处进行超声导波的激励与接收, 超声导波经过轨腰到轨头或者轨底的传导路径后缺陷特征淹没在了超声导波在不同区域内的模态转换中, 从而导致对轨头和轨底缺陷检出能力不足。

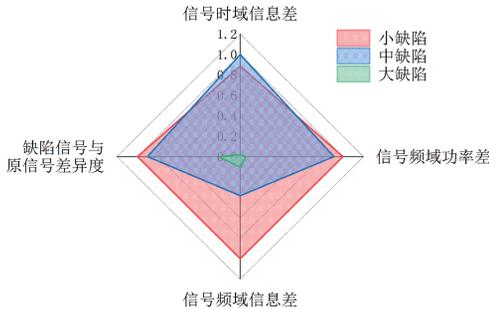
区域检测效果受限, 仅轨头单一参数呈现规律响应, 轨底未现有效特征。综上所述, NLFM-Barker 复合编码在钢轨腰部缺陷检测中展现出优异性能, 可支撑缺陷量化分析。后续研究将结合导波传播模态分析, 进一步优化 NLFM-Barker 编码在不同钢轨区域的检测性能, 为钢轨的复合编码激励超声导波检测技术的实际应用提供理论依据。

参考文献

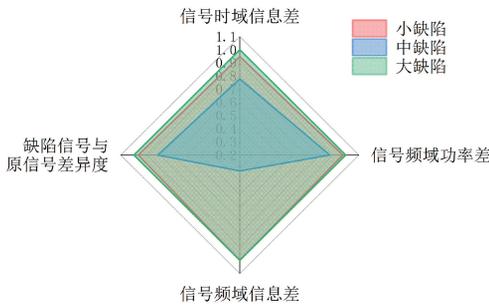
- [1] 赵凯辉, 邱鹏旗, 张昌凡, 等. 高速列车分布式速度协同跟踪控制方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(9): 12-20.
ZHAO K H, QIU P Q, ZHANG CH F, et al. Research on distributed speed coordinated tracking control for high-speed train[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(9): 12-20.
- [2] XIE J, DING W, ZOU W, et al. Defect detection inside



(a) 轨头处特征参数归一化对比
 (a) The Normalized feature parameter comparison at Rail Head



(b) 轨腰处特征参数归一化对比
 (b) Normalized feature parameter comparison at Rail Web



(c) 轨底处特征参数归一化对比
 (c) The Normalized feature parameter comparison at Rail Foot

图 20 轨头、轨腰与轨底处特征参数的归一化对比
 Fig. 20 Normalized feature parameter comparison across critical rail zones: head, web, and foot

a rail head by ultrasonic guided waves[J]. Symmetry, 2022, 14(12): 2566.

[3] GE H, CHUA KIM HUAT D, KOH C G, et al. Guided wave-based rail flaw detection technologies: State-of-the-art review [J]. Structural Health Monitoring, 2022, 21(3): 1287-1308.

[4] 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.

ZHANG H, SONG Y N, WANG Y N, et al. Review of rail defect non-destructive testing and evaluation [J].

Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 11-25.

[5] LEE H, KOO B, CHATTOPADHYAY A, et al. Damage detection technique using ultrasonic guided waves and outlier detection: Application to interface delamination diagnosis of integrated circuit package [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 160: 107884.

[6] FAN Z, NIU X, MIAO B, et al. Hybrid coded excitation of the torsional guided wave mode T(0,1) for oil and gas pipeline inspection[J]. Applied Sciences, 2022, 12(2): 777.

[7] HERNANDEZ Á, PEREZ M C, GARCIA J J, et al. FPGA-based track circuit for railways using transmission encoding [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(2): 437-448.

[8] 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 the detection method of the steel plate with Lamb wave EMATs based on phase coded pulse compression [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 117-127.

[9] 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 the identification method of small cracks on the bottom of ultrasonic guided waves based on codec [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(2): 130-135.

[10] ROUYER J, MENSAH S, VASSEUR C, et al. The benefits of compression methods in acoustic coherence tomography [J]. Ultrasonic Imaging, 2015, 37(3): 205-223.

[11] 孟凌霄, 石文泽, 卢超, 等. 基于编码压缩的纤维缠绕气瓶贴附式电磁超声检测方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 82-99.

MENG L X, SHI W Z, LU CH, et al. Research on the attached electromagnetic acoustic detection method of fiber? wrapped gas cylinder based on coded compression [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 82-99.

[12] WENG C, GU X, JIN H. Coded excitation for ultrasonic testing: A review [J]. Sensors, 2024, 24(7): 2167.

[13] CHENG J, SHI W, LU C, et al. Study and comparison of pulse compression techniques with three types of excitation for high-temperature EMAT detection [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2022, 64(3): 138-145.

- [14] 张佳莹, 丛森, 刚铁, 等. 基于频率-相位编码信号激励的焊缝超声检测分析[J]. 焊接学报, 2018, 39(7): 7-11.
ZHANG J Y, CONG S, GANG T, et al. Ultrasonic inspection analysis of weld based on frequency-phase coded signal excitation [J]. Transaction of The China Welding institution, 2018, 39(7): 7-11.
- [15] YANG Y, WANG P, JIA Y, et al. Rail fracture monitoring based on ultrasonic-guided wave technology with multivariate coded excitation [J]. Ultrasonics, 2024, 136: 107164.
- [16] WANG X, YANG J, JI J, et al. Research on Golay-coded excitation in real-time imaging of high frequency ultrasound biomicroscopy[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 1848.
- [17] HE X N, DIAO X F, LIN H M, et al. Improved shear wave motion detection using coded excitation for transient elastography[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 44483.
- [18] COWELL D M J, FREEAR S. Separation of overlapping linear frequency modulated (LFM) signals using the fractional Fourier transform [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2010, 57(10): 2324 - 2333.
- [19] 刘少强, 姜军. 基于 FPGA 的线性调频信号脉冲压缩设计[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(4): 44-47.
LIU SH Q, JIANG J, Design of linear frequency modulation signals pulse compression based on FPGA [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(4): 44-47.
- [20] 阮黎婷, 韩建莉, 罗丰, 等. 基于多组合窗函数的 NLFM 信号匹配滤波器设计[J]. 空间电子技术, 2010, 7(3): 11-14, 23.
YUAN L T, HAN J L, LUO F, et al. Design of NLFM signal matching filter based on multiple combined window functions [J]. Space Electronic Technology, 2010, 7(3): 11-14.
- [21] 刘波, 郭建中. 载频调制二相编码激励的超声成像信噪比提高研究[J]. 电子学报, 2011, 39(11): 2701-2707.
LIU B, GUO J ZH. Research on SNR improvement in ultrasonic imaging by coded excitation with carrier modulation[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(11): 2701-2707.
- [22] 曹新容, 薛岚燕, 林嘉雯, 等. 基于匹配滤波和自动阈值的眼底血管分割方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(1): 51-57.
CAO X R, XUE L Y, LIN J W, et al. Retinal vessel segmentation method based on matched filtering and automatic threshold [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(1): 51-57.
- [23] 刘学承, 朱敏, 武岩波. 适用任意平面阵列的二维宽带 DOA 快速估计算法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(7): 102-111.
LIU X CH, ZHU M, WU Y B, A fast 2-D wideband direction-of-arrival estimation method with arbitrary planar arrays [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(7): 102-111.
- [24] 程进杰, 石文泽, 卢超, 等. 脉冲压缩技术在高温连铸电磁超声测厚应用研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(8): 20.
CHENG J J, SHI W Z, LU CH, et al. Application of pulse compression technology in electromagnetic ultrasonic thickness measurement of high-temperature continuous casting [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(8): 20.
- [25] YUCEL M K, FATERI S, LEGG M, et al. Coded waveform excitation for high-resolution ultrasonic guided wave response [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(1): 257-266.
- [26] 焦敬品, 张永强, 孙俊俊, 等. 低频单—A0 模态压电换能器设计及在板结构无损检测中应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(22): 7-13.
JIAO J P, ZHANG Y Q, SUN J J, et al. Design of low frequency piezoelectricity transducer for excitation of pure A0 lamb wave and its application in nondestructive testing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(22): 7-13.
- [27] 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 code excited ultrasonic guided waves in broken rail detection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8): 101-108.
- [28] LU H, CHANDRAN B, WU W, et al. Damage features for structural health monitoring based on ultrasonic Lamb waves: Evaluation criteria, survey of recent work and outlook[J]. Measurement, 2024, 232: 114666.
- [29] 邢博. 基于超声导波的钢轨裂纹检测方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2020.
XING B. Research on rail crack detection method based on ultrasonic guided waves[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [30] SUN F, CHEN J, ZHANG J, et al. Study on the surface/subsurface defects of cylindrical components

based on laser ultrasonic technology[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 180: 111399.

- [31] HU M, HE J, ZHOU C, et al. Surface damage detection of steel plate with different depths based on Lamb wave[J]. *Measurement*, 2022, 187: 110364.

作者简介



魏小源 (通信作者), 2012 年于西北师范大学获得学士学位, 2015 年于西安理工大学获得硕士学位, 2020 年于西安理工大学获得博士学位, 现为兰州理工大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为智能检测与信息处理。

E-mail: weixy@lut.edu.cn

Wei Xiaoyuan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Northwest Normal University in 2012 and M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2015, and Ph. D. degree from Xi'an University of Technology in 2020, respectively. Now he is an associate professor and Master's supervisor in Lanzhou University of Technology. His main research interests include intelligent detection and information processing.



戴晶, 2022 年于湖北工程学院获得学士学位, 现为兰州理工大学在读硕士研究生, 主要研究方向为超声导波缺陷定量评价方法。

E-mail: 1394064839@qq.com

Dai Jing received his B. Sc. Degree from Hubei Engineering University. Now he is a M. Sc. candidate in Lanzhou University of Technology. His main research interests include quantitative evaluation method of defects based on ultrasonic guided waves.



井晶, 2023 年于南京邮电大学获得学士学位, 现为兰州理工大学在读硕士研究生, 主要研究方向为长距离钢轨超声导波通信方法。

E-mail: 18209717578@163.com

Jing Jing received her B. Sc. Degree from Nanjing University of Posts and Telecommunications. Now she is a M. Sc. candidate in Lanzhou University of Technology. Her main research interests include ultrasonic guided wave communication method for long-distance rails.



杨晓辉, 2023 年于洛阳理工学院获得学士学位, 现为兰州理工大学在读硕士研究生, 主要研究方向为压电超声换能器性能优化。

E-mail: 389396715@qq.com

Yang Xiaohui received his B. Sc. Degree from Luoyang Institute of Science and Technology in 2023. Now he is a M. Sc. candidate in Lanzhou University of Technology. His main research interest includes performance optimization of piezoelectric ultrasonic transducers.



张雅文, 2022 年于长沙理工大学获得学士学位, 现为兰州理工大学在读硕士研究生, 主要研究方向为超声导波缺陷定量评价方法。

E-mail: yawen710@163.com

Zhang Yawen received her B. Sc. degree from Changsha University of Science & Technology in 2022. Now she is a M. Sc. candidate in Lanzhou University of Technology. Her main research interests include quantitative evaluation method of defects based on ultrasonic guided waves.