

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209371

基于同步挤压小波和脉冲压缩的钢轨踏面裂纹 电磁超声表面波检测方法研究*

余丽婷¹, 卢超^{1,2}, 石文泽², 陈果², 管立新¹

(1. 赣南师范大学江西省数值模拟与仿真技术重点实验室 赣州 341000; 2. 南昌航空大学无损检测教育部重点实验室 南昌 330063)

摘要: 钢轨踏面上的疲劳裂纹严重影响着列车行车安全。针对如何快速有效地检测出踏面斜裂纹的问题, 本文提出了一种快速检测钢轨踏面裂纹的方法。首先分别建立了含高斯白噪声、正弦信号加高斯白噪声干扰的数学模型, 分析了编码脉冲压缩、同步挤压小波变换和先同步挤压小波变换后脉冲压缩共 3 种信号处理方法的噪音抑制效果。其次, 为了验证上述方法对噪音的抑制能力, 使用激励频率为 1 MHz 的表面波电磁超声换能器对含裂纹的钢轨踏面进行检测。最后, 以检测得到裂纹的超声回波为研究对象, 比较了希尔伯特黄方法处理单一频率脉冲对应的超声回波信号和先同步挤压后脉冲压缩方法对应的降噪能力和超声成像效果。实验结果表明: 本文所提方法可以获得钢轨踏面裂纹的位置信息及其数量。希尔伯特黄变换在处理无同步平均的原始超声回波时, 由于回波信噪比低, 经验模态分解 (EMD) 失效。在以巴克码为激励信号且无同步平均采集的条件下, 先进行同步挤压小波变换后脉冲压缩处理, 得到的超声回波信噪比相较于只采用相位编码脉冲压缩提高了 6.82 dB, 相比于只做同步挤压小波变换提高了 11.02 dB, 能明显提升检测速度和 B 扫图像分辨率。

关键词: 钢轨踏面; 电磁超声; 同步挤压小波; 脉冲压缩; B 扫成像

中图分类号: TH878 TB552 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on the electromagnetic ultrasonic surface wave detection method of rail tread crack based on synchrosqueezed wavelet transform and pulse compression

Yu Liting¹, Lu Chao^{1,2}, Shi Wenzhe², Chen Guo², Guan Lixin¹

(1. Key Laboratory of Simulation and Numerical Modeling Technology of Jiangxi Province, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China; 2. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Fatigue cracks on the rail tread seriously affect the safety of trains. To address the problem that detects rail tread cracks quickly and effectively, a method for rapid detection of rail tread cracks is proposed in this article. Firstly, the mathematical models with Gaussian white noise and sinusoidal signal plus Gaussian white noise interference are formulated respectively. The noise suppression effectiveness of three signal processing methods are analyzed, including the coded pulse compression, the synchrosqueezed wavelet transform and the pulse compression after synchrosqueezed wavelet transform method. Secondly, to evaluate the noise suppression ability of the above methods, the surface wave electromagnetic ultrasonic transducer with excitation frequency of 1 MHz is used to detect the rail tread with cracks. Finally, the ultrasonic echo of the detected crack is taken as the research object. The noise reduction ability and ultrasonic imaging effect of the Hilbert Huang method for processing the ultrasonic echo signal corresponding to a single frequency pulse and the method of synchrosqueezed wavelet transform followed by pulse compression are compared. Results show that the proposed method can obtain the location and number of cracks on the rail tread. When Hilbert Huang transform is used to process the original ultrasonic echo with no synchronous average, the signal-to-noise ratio of the echo is low, which causes the failure of the empirical mode decomposition (EMD). Under the condition that Barker code is used as the excitation signal and there is no synchronous average

收稿日期: 2022-03-02 Received Date: 2022-03-02

* 基金项目: 国家自然科学基金 (12064001, 52065049, 51705231)、江西省主要学科学术和技术带头人培养计划 (20204BCJL22039)、江西省科技创新平台 (20192BCD40028)、江西省杰出青年基金 (20212ACB214010) 项目资助

acquisition, the signal-to-noise ratio of ultrasonic echo obtained by using the pulse compression after synchrosqueezed wavelet transform method is 6.82 dB higher than that using only phase coding pulse compression. It is 11.02 dB higher than that using only synchrosqueezed wavelet transform, which can significantly improve the detection speed and B-scan image definition.

Keywords: rail tread; electromagnetic acoustic transducer; synchrosqueezed wavelet transform; pulse compression; B-scan image

0 引言

在铁路系统向高速化、重载化发展的情况下,钢轨踏面出现的裂纹损伤是由钢轨的滚动接触疲劳所引起^[1]。为保障列车安全运行,定期开展钢轨探伤是不可或缺的一环。

常见的钢轨探伤方法有磁粉检测、射线检测和渗透检测等^[2],但射线检测设备笨重且存在放射性等安全隐患,渗透检测检测成本高且会对环境造成污染。相较于以上无损检测方法,电磁超声检测因其具有不需要耦合剂、检测效率高和可在线检测/监测等优点而得到广泛应用^[3]。超声表面波能检测到试样表面或近表面缺陷^[4],能对裂纹损伤的深度及形貌进行定量检测^[5]。当踏面裂纹扩展到一定深度(6~10 mm)时,迅速转为轨头横向裂纹^[6],最后致使钢轨轨头发生横向断裂。因此,利用电磁超声表面波检测位于试样表面的缺陷具有重要的工程价值。

电磁超声表面波在缺陷检测中已经得到了广泛应用,例如 Shull 等^[7]搭建了一套基于表面波的轨头表面纵向裂纹检测系统,根据含裂纹区域传播的瑞利波的振幅或相对频率估计裂纹深度。刘素贞等^[8]通过钢板中电磁超声表面波检测有限元仿真,得到了板缺陷深度与表面波反射系数、透射系数的关系。Trushkevych 等^[9]开发了一套小型电磁超声检测系统,利用表面波检测涂层样品缺陷,通过扫描获得缺陷的横向尺寸和深度。胡松涛等^[10]设计了能够激励出表面波的电磁超声换能器,通过实验验证了该换能器能有效地检出踏面裂纹。

由于电磁超声换能器(electromagnetic ultrasonic transducer, EMAT)换能效率低和易受环境噪声干扰等问题,使得超声回波信号的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)低,限制了电磁超声表面波技术在钢轨踏面裂纹在线快速检测中的广泛应用^[11]。针对以上问题,采用先进的信号处理算法能够有效地增强 EMAT 检测回波的信噪比。例如,希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)和同步挤压小波变换(synchrosqueezed wavelet transform, SWT)等时频分析方法均可以用于信号降噪,但 HHT 在对信号进行经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)时,会存在包络拟合、端点效应、模态混叠和筛选停止准则等问题^[12]。SWT 在频率方向上对检测回波和噪声进行分离,重构出信噪比较高的信号。

同时 SWT 具有时频分辨率高、抗噪声性能强等特点^[13],能较好的解决频率混叠问题^[14]。国内外学者已经将 SWT 应用于故障检测^[15-16]。但对于 EMAT 来说,滤波后的信号强度较差,容易导致小幅值缺陷回波被忽视。因此,仅仅采用同步挤压小波变换将很难显著提高 EMAT 检测回波的信噪比。

脉冲压缩技术(pulse compression technique, PCT)^[17]可以在不提升设备发射峰值功率的条件下,获得窄脉冲、高峰值脉冲信号。将 PCT 应用于 EMAT,在提高检测回波 SNR 的同时,还提高了空间分辨率^[18],可以在不提高超声检测系统的功放输出功率的情况下,检测出规格更小的缺陷。国内外学者已经将 PCT 应用于超声检测领域,例如 Laureti 等^[19]将 PCT 用到了混凝土试样的压电超声检测中,可降低由骨料或钢筋等散射体对缺陷回波造成的影响,通过实验验证了 PCT 具有提升超声回波 SNR 的效果。安阳等^[20]将 PCT 用于天然气管道压电超声检测,该技术不仅能准确定位水合物堵塞和管道泄漏,而且能实时监测水合物形成过程。经巴克码 PCT 处理后的超声回波信号,会产生干扰回波信号识别的旁瓣,对小缺陷回波信号的干扰更为严重。宋寿鹏等^[21]提出的非线性调频 Barker 复合编码激励超声波方法能明显降低信号的峰值旁瓣水平。

为了进一步提高钢轨踏面电磁超声表面波检测回波的信噪比,本文采用数值仿真和实验相结合的研究方法,验证了 PCT 和 SWT 组合方法对噪音有显著的抑制能力。为了克服 EMAT 易受环境噪声干扰导致信噪比低等问题,以适应快速巡查监测,对单次平均的检测回波先采用 SWT 后运用 PCT 进行去噪,在提高 B 扫检测速度的同时还能明显提高图像清晰度。

1 表面波 EMAT 换能机理及脉冲压缩实现过程

1.1 表面波 EMAT 换能机理

图 1 为表面波 EMAT 的配置形式及换能机理。当被检工件为铁磁性材料时,换能过程中存在洛伦兹力和磁致伸缩这两种机理^[22]。图 1 中的 EMAT 换能机理以洛伦兹力为主^[23],当 EMAT 中通以高频脉冲电流时,试样近表层产生电涡流,电涡流在永磁体提供的静态磁场和交变磁场共同作用下,产生了交变的洛伦兹力,而洛伦兹力带动试样表面粒子进行周期性的高频振动,形成超声

波。当超声波波长与曲折线圈间距满足式(1)时,EMAT 激发的表面波幅值最大^[24]。

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f} \quad (1)$$

式中: f 为激励频率, λ 为超声波波长, l 为线圈导线间距, c 为超声波声速。本文采用的激励频率为 1 MHz,易知 l 为 1.565 mm。

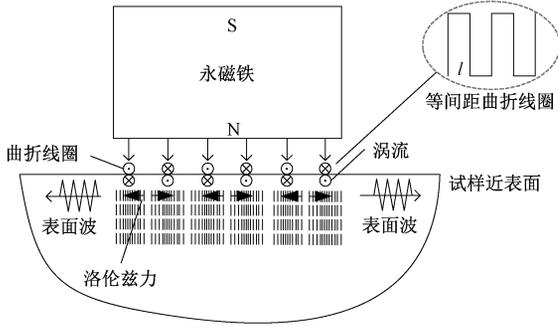


图 1 表面波 EMAT 换能机理

Fig.1 Mechanism of surface wave EMAT

由洛伦兹力机理下产生的表面波在钢轨中的传播控制方程表示为^[25]:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - \nabla \cdot \mathbf{T} = \mathbf{f}_L \quad (2)$$

式中: \mathbf{u} 为表面波位移矢量, ρ 为材料密度, \mathbf{f}_L 为洛伦兹力, \mathbf{T} 为应力张量。

1.2 脉冲压缩及旁瓣抑制技术

Barker 码具有理想的自相关特性,因此能得到幅值足够小的距离旁瓣^[26]。采用峰值旁瓣电平 (peak side-lobe level, PSL) 指标来评估旁瓣抑制算法的有效性。目前能够找到的巴克码序列长度有 7 种,其中,13 位 Barker 码的 PSL 为 22.3 dB^[27]。式(3)为计算 PSL 的公式:

$$PSL = -20 \lg \frac{1}{N} \quad (3)$$

式中: N 为 Barker 码的位数。

Barker 码激励信号 $u[m]$ 和码元序列 $v[m]$ 可以表示为:

$$u[m] = \sum_{k=0}^{N-1} C_k v[m - kM], m = 0, 1, \dots, LM - 2, \quad (4)$$

$$v[s] = \begin{cases} f\left(\frac{sT_c}{M-1}\right), & s = 0, 1, 2, \dots, m-2, m-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

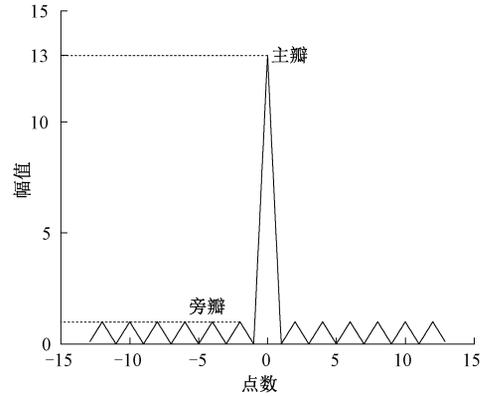
式中: L 为 Barker 码码长, M 为子脉冲时间宽度, T_c 为码元持续时间, $C_k = \pm 1$ 为 Barker 码序列。

在曲折线圈上加激励信号 $u[m]$,接收端得到的回波信号为 $s[m]$,经 PCT 后的信号 $y_i[m]$ 可通过式(6)计算得到^[28]:

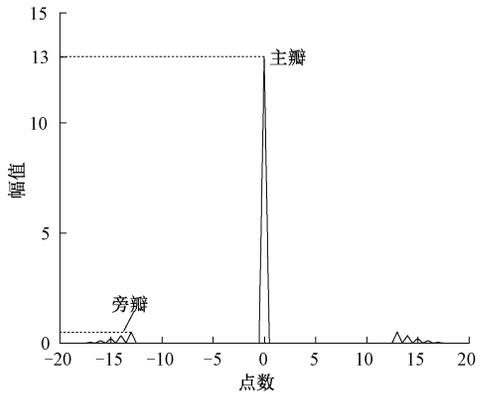
$$y_i[m] = \int_0^T u[m] \cdot s[m + \tau] d\tau \quad (6)$$

式中: T 为 Barker 码长度, τ 为自变量。

由图 2(a)可知,13 位 Barker 序列经脉冲压缩后,主瓣的左右两边各有 6 个旁瓣,底宽均为 $2T_c$ 。信号经 PCT 处理后,再进行 12 次延迟,每次延迟的时间为 $2T_c$,延迟后的信号乘上对应的系数后再进行累加,使得旁瓣信号向数轴的正、负方向推移。在 $-12T_c < t < 12T_c$ 内几乎不存在旁瓣,图 2(b)说明旁瓣会在 $|t| > 12T_c$ 外出现。根据实际需要,可以增加或减少延迟线节数,旁瓣出现的位置可由延迟节数决定^[29]。



(a) 13位Barker码自相关运算
(a) Self-correlation for 13-bit Barker code



(b) 13位Barker码自相关运算(12次延迟)
(b) Self-correlation for 13-bit Barker code(postponed 12 times)

图 2 13 位巴克码经脉冲压缩和旁边抑制

Fig.2 13-bit Barker code with pulse compression and side-lobe suppression

2 SWT 原理

HHT 方法处理信噪比较差的信号时,容易出现模态混叠,致使 EMD 分解失败,无法得到信号的 HHT 时频图。Daubechies 等^[30]提出的 SWT 算法可以将具有相同

瞬时频率的小波系数相加成为 SWT 系数,通过对小波系数在中心频率附近进行挤压,得到更高的时频分辨率,且抗噪声能力强。时变信号 $f(t)$ 可以表示为多个分量求和的形式:

$$f(t) = \sum_{k=1}^n f_k(t) = \sum_{k=1}^n A_k(t) \cos(2\pi w_k t + \phi_k) \quad (7)$$

式中: $A_k(t)$ 、 w_k 、 ϕ_k 为第 k 个分量的瞬时幅值、瞬时频率和相位, n 为可分解分量的个数。

对时变信号 $f(t)$ 进行连续小波变换,得到时域小波系数 $W_f(a, b)$ 为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (8)$$

式中: a 为尺度因子; b 平移因子; ψ 为母小波函数; “*” 为共轭; 由 Plancherel 原理将小波系数等价变换到频域, 则有:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{2\pi} \int \frac{1}{\sqrt{a}} \hat{f}(\xi) \hat{\psi}^*(a\xi) e^{ib\xi} d\xi \quad (9)$$

式中: ξ 为角频率; $\hat{f}(\xi)$ 、 $\hat{\psi}(\xi)$ 分别为 $f(t)$ 、 $\psi(t)$ 的傅里叶变换。

对于单一的正弦函数 $f(t) = A \cos(\omega t)$ 的傅里叶变换为:

$$\hat{f}(\xi) = \pi A [\delta(\xi - \omega) + \delta(\xi + \omega)] \quad (10)$$

将 $\hat{f}(\xi)$ 代入式(8)化简整理得:

$$W_f(a, b) = \frac{A}{2\sqrt{a}} \hat{\psi}^*(a\xi) e^{ib\xi} \quad (11)$$

若 $\hat{\psi}(\xi)$ 在负频率域趋向于 0, 且在 $\xi = \omega_0$ 的一定范围内集中分布, 则小波系数将集中分布在 $a = \frac{\omega_0}{\omega}$ 处, 对 $W_f(a, b)$ 求偏导可求得瞬时频率, 即:

$$\omega_f(a, b) = \begin{cases} -j \partial_b W_f(a, b) / W_f(a, b), & W_f(a, b) \neq 0 \\ \infty, & W_f(a, b) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

将中心频率 ω_l 区间 $[\omega_l - \frac{1}{2}\Delta\omega, \omega_l + \frac{1}{2}\Delta\omega]$ 内的数值进行压缩, 可得 SWT 的量值 $T_f(\omega_l, b)$, 即:

$$T_f(\omega_l, b) = \sum_{a_i: |\omega_f(a, b) - \omega_l| \leq \frac{\Delta\omega}{2}} W_f(a, b) a_i^{-\frac{3}{2}} (\Delta a)_i \quad (13)$$

SWT 的逆变换为:

$$f(t) = \text{Re} \left[C_\psi^{-1} \sum_i T_f(\omega_l, b) (\Delta\omega) \right] \quad (14)$$

式中: $C_\psi^{-1} = \int_0^{+\infty} \psi^*(\xi) \frac{d\xi}{\xi}$, $\psi^*(\xi)$ 为母小波函数的共轭傅里叶变换; Re 表示取实部; a_i 为离散的尺度; i 为尺度个数。

回波信号的瞬时频率在 1 MHz 附近, 经 SWT 后, 可以在频率轴上观察到回波信号和噪声发生了分离。经过式(13)对回波信号时频谱的挤压, 使回波信号和噪声进一步分离。通过式(14)重构可以得到去噪后的超声回波。

3 SWT 和 PCT 组合方法抑制效果的数值仿真

SWT 和 Barker 码的 PCT 组合降噪方案如图 3 所示, 首先采用 SWT 处理原始超声 A 扫信号, 得到它的时频图, 原始信号的瞬时频率为 1 MHz, 提取频率方向的谱系数, 并重构 A 扫信号, 重构出噪声较小的信号, 最后对重建的 A 扫信号进行脉冲压缩和旁瓣抑制, 从而得到 SNR 较高的窄脉冲信号。

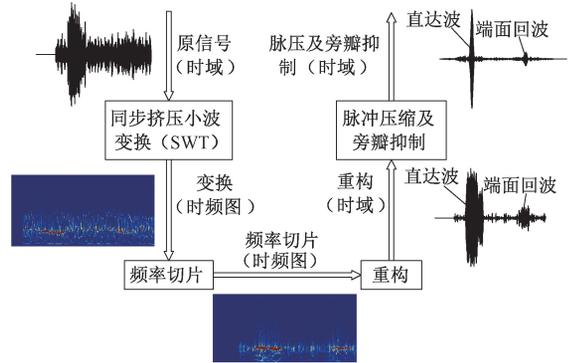


图3 基于 SWT 和 PCT 的组合方法的降噪处理方案

Fig. 3 Noise reduction scheme based on combination method of SWT and PCT

设计仿真信号的频率为 1 MHz, 图 4 为采用 Matlab 仿真软件建立的仿真信号, 单个码元长度为 5 μs , 记为原信号 $s_1(t)$ 。

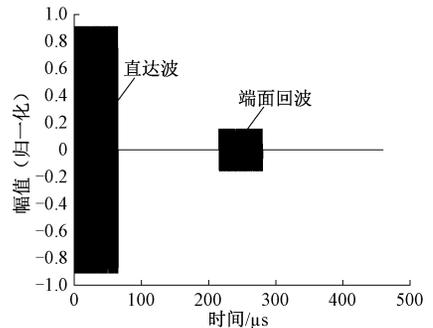


图4 原始信号 $s_1(t)$ 波形

Fig. 4 Waveform of original signal $s_1(t)$

3.1 高斯噪声干扰模型数值分析

图 5(a) 为激励频率 1 MHz 时采集到的巴克码参考信号。噪声选取高斯噪声的形式, 仿真构建 SNR 为 1 dB

的 $s_2(t)$ 信号,如图 5(b)所示。将图 5(a) 的激励信号与图 5(b) 所示的超声波信号进行卷积,经旁瓣抑制后,结果如图 5(c) 所示,图 5(c) 的 SNR 为 16.99 dB,相较于图 5(b) 的 SNR 提高了 15.99 dB。

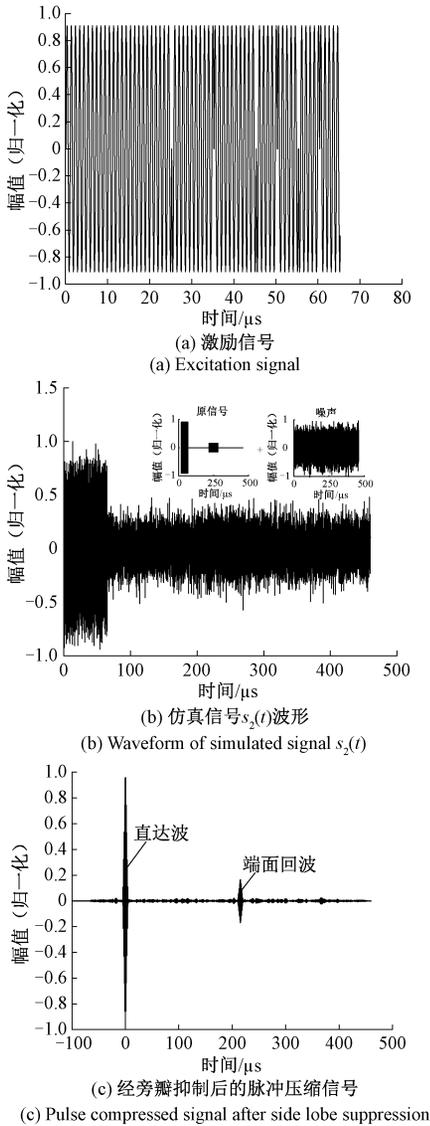


图 5 脉冲压缩处理信号结果

Fig. 5 Results of the pulse compressed signal processing

对信号 $s_2(t)$ 进行 SWT 处理,得到图 6(a) 所示时频图,高斯噪声分布在整个时频域,在时频图上噪声与信号发生了明显分离。通过谱系数进行信号重构,图 6(b) 为重构出的信号。图 6(b) 的 SNR 为 7.13 dB,再对图 6(b) 信号做脉冲压缩及旁瓣抑制,处理后的结果如图 6(c) 所示,图 6(c) 的 SNR 为 17.79 dB。对比于只采用 PCT,SNR 仅提高了 0.8 dB。

由图 5 和 6 可知,对于高斯噪声干扰模型,SWT 和 PCT 组合方法与只采用 PCT 方法在提高 SNR 方面的

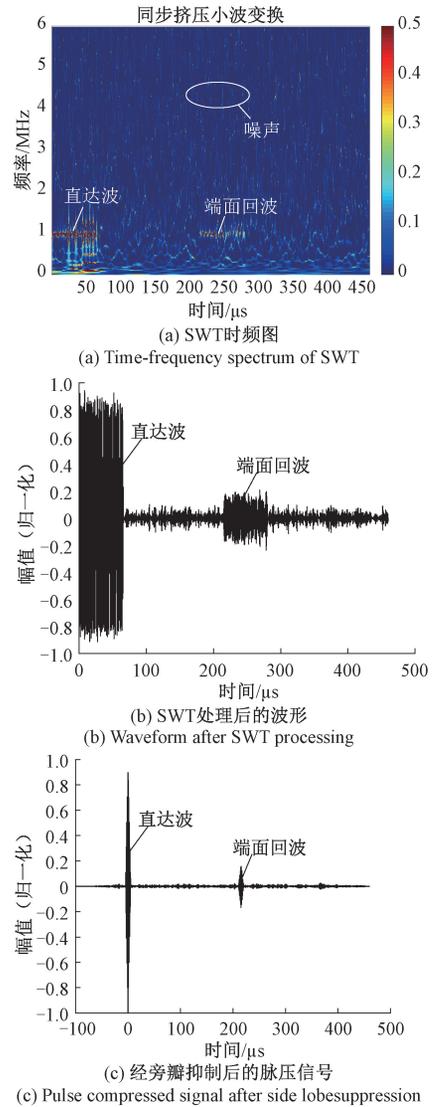


图 6 SWT 和 PCT 组合方法处理信号的结果
Fig. 6 Result of signal processing with SWT and PCT combination method

效果相近,故在噪声成分为高斯噪声的情况下,使用 PCT 即可达到增强信噪比的效果。

3.2 正弦与高斯噪声双干扰模型数值分析

在图 3 的 $s_1(t)$ 信号基础上,叠加时长为 $460 \mu s$ 的正弦信号,其由频率在 1 MHz 附近且幅值不同的多种正弦信号叠加得到,再加入高斯噪声,得到 SNR 为 1 dB 的信号 $s_3(t)$,如图 7(a) 所示。

图 7(a) 的信号 $s_3(t)$ 经脉冲压缩及旁瓣抑制后,得到如图 7(b) 所示的信号,它的 SNR 为 10.40 dB,相较于 $s_3(t)$ 的 SNR 提高了 9.40 dB。由图 7(b) 可知,经 PCT 处理后,信号中的噪声分量被放大,影响缺陷回波的识别。为了避免不重要的信号分量被放大,进一步提高脉

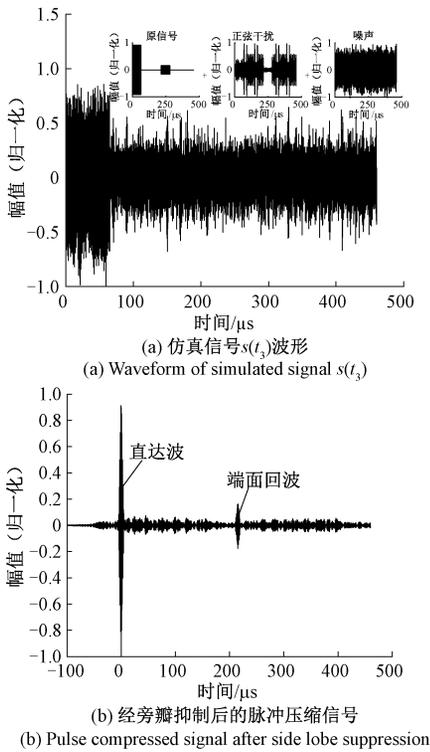


图7 脉冲压缩处理的信号结果

Fig. 7 Results of the pulse compressed signal processing

压信号的 SNR,应采用 SWT 算法作为噪声预处理方法,即采用 SWT 和 PCT 组合方法对信号 $s_3(t)$ 进行处理。

采用 SWT 和 PCT 组合方法处理信号 $s_3(t)$,对信号 $s_3(t)$ 进行 SWT,得到图 8(a) 所示的时频图,在信号主频 1 MHz 附近存在能量较强的噪声,通过式 (12) 对信号的时频谱进行挤压,使得回波信号和噪声在频率轴上发生分离。通过式 (14) 重构回波信号,图 8(b) 为重构后的信号,它的 SNR 为 4.55 dB,图 8(b) 信号经脉冲压缩及旁瓣抑制后的结果如图 8(c) 所示,图 8(c) 的 SNR 为 17.14 dB。

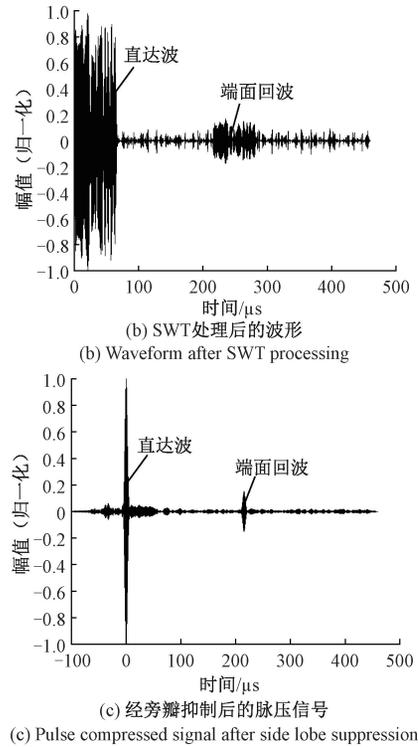
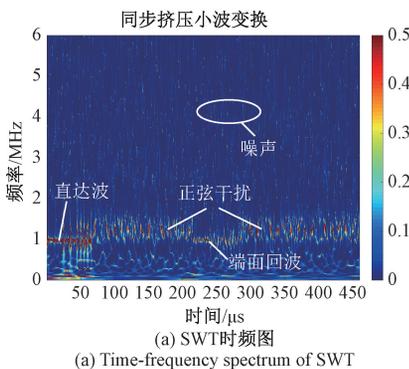


图8 SWT 和 PCT 组合方法处理信号的结果

Fig. 8 Result of signal processing with SWT and PCT combination method

采用 PCT 和 SWT 分别处理两种干扰模型得到的 SNR 对比结果如表 1 所示。由表 1 可知,在只有高斯噪声干扰的情况下,采用 PCT 即可以得到较高的 SNR。在正弦与高斯噪声双干扰的情况下,只采用 PCT,会将一部分噪声分量放大,使得缺陷判定受到噪声影响。通过基于 SWT 和 PCT 的组合方法处理正弦与高斯噪声双干扰的模型,能够去除大部分不必要被放大的噪声成分,而得到较好的 SNR,相较于只采用 PCT 的方法,SNR 提高了 6.74 dB,相比于只采用 SWT,SNR 提高了 12.59 dB。

表 1 PCT、SWT 和 SWT+PCT 组合方法处对应的 SNR
Table 1 Comparison of the SNRs among PCT, SWT, and the combination method of SWT and PCT dB

信号类型	高斯噪声干扰	高斯噪声+正弦脉冲干扰
原始信号 SNR	1.00	1.00
仅 SWT 的信号 SNR	7.13	4.55
仅 PCT 的信号 SNR	16.99	10.40
组合方法的信号 SNR	17.79	17.14

4 组合方法在钢轨踏面裂纹表面波 A 扫检测中的应用

4.1 电磁超声检测系统构成

图 9 为实验所采用的电磁超声检测系统,由安装有 LabVIEW 软件界面的电脑、功率放大器 RITEC RPR-4000、阻抗匹配器、表面波 EMAT 探头、任意信号发生器 AFG-2022B 和数据采集卡等组成。任意信号发生器给 EMAT 提供 $65 \mu\text{s}$ 的巴克码激励信号,经功率放大器,产生大幅值的激励电流,进行阻抗匹配后,电流流入曲折线圈,进而产生表面波。超声波到达接收 EMAT 后,经阻抗匹配后进行信号的放大和滤波,由数据采集卡传送至 LabVIEW 软件界面。EMAT 探头的激励频率为 1 MHz ,带通滤波器参数设置为 $0.1 \sim 3 \text{ MHz}$ 。

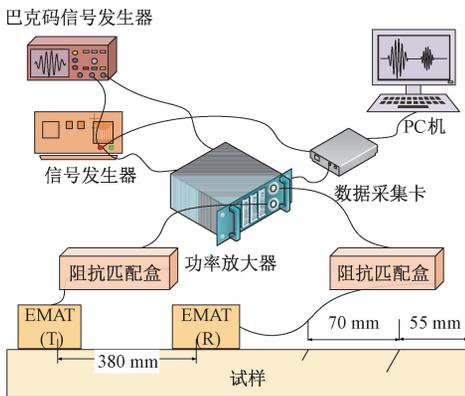


图 9 钢轨踏面表面波 EMAT 检测实验系统框图

Fig. 9 Block diagram of surface wave EMAT detection system for rail tread

4.2 实验验证

图 10(a) 为实验所采用的以正弦脉冲串为码元的 Barker 码激励信号,以采集无同步平均的 A 扫信号作为处理对象,无同步平均 A 扫信号如图 10(b) 所示。从图 10(b) 中可看出,端面回波几乎淹没在噪声中,其 SNR 仅为 7.89 dB 。若对图 10(b) 信号直接进行 PCT 处理,结果如图 10(c) 所示,可大致看出直达波与端面回波出现的位置,端面回波的识别受脉压后的噪声波包干扰,导致端面回波识别度不高。经计算得到脉压信号的 SNR 为 17.57 dB 。

对图 10(b) 只进行 PCT 处理,在中心频率 1 MHz 附近能量较强的噪声被放大,从而影响了缺陷回波的识别。用 SWT 和 PCT 组合方法对图 10(b) 信号进行处理,

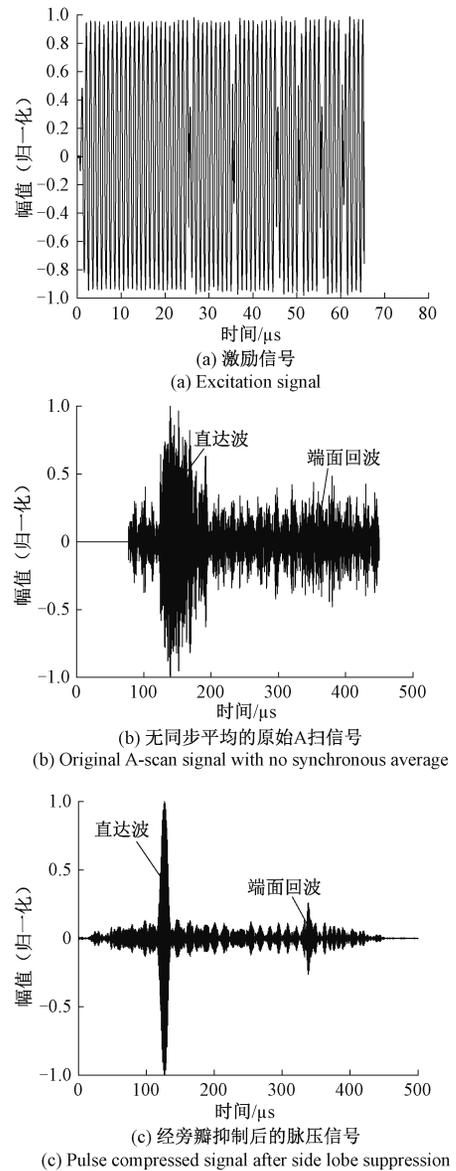


图 10 脉冲压缩处理信号结果

Fig. 10 Results of the pulse compressed signal processing

图 11(a) 为图 10(b) 经 SWT 后的时频图,对信号的时频谱进行挤压后,滤除中心频率附近的强噪声,最后再对图 11(b) 信号进行 PCT 处理,处理结果如图 11(c) 所示,可见大部分噪声已被去除,其 SNR 可达 24 dB ,相比于只进行 PCT 处理提高了 6.43 dB 。

由图 10 和 11 可知,经 PCT 和 SWT 的组合方法处理得到的 SNR 相较于仅采用 PCT 提升了 6.43 dB 。实验结果和数学模拟结果一致,验证了 SWT 和 PCT 组合方法的有效性,对抑制检测回波中心频率附近存在的强噪声有特别明显的效果。

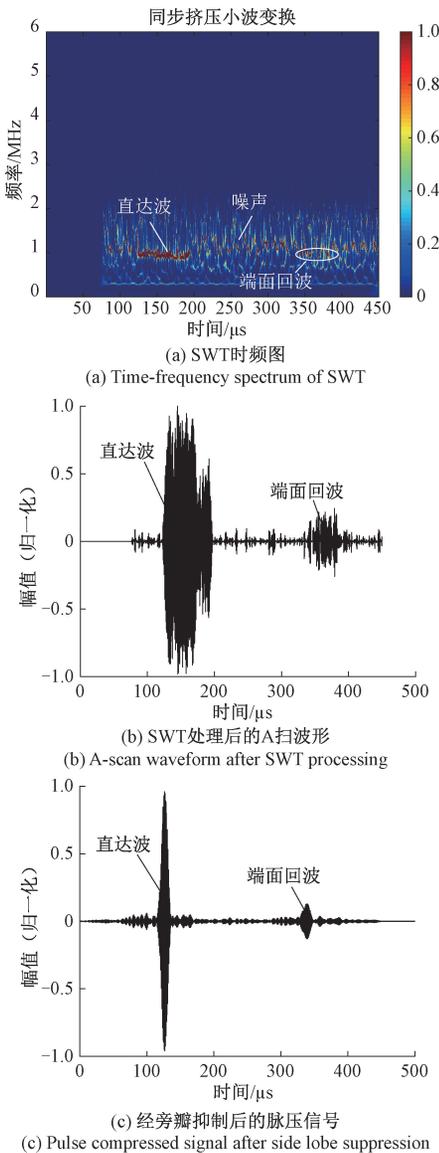


图 11 组合方法处理信号结果

Fig. 11 Results of the signal processed by the combination method

5 HHT 和 SWT-PCT 组合方法在钢轨踏面裂纹表面波检测信号中的应用

5.1 单一频率脉冲串激励时的钢轨踏面裂纹 B 扫成像

图 12 为表面波 EMAT 检测钢轨踏面裂纹的实物图, 2 个 EMAT 放置在裂纹的同一侧, 所激励的表面波频率为 1 MHz。钢轨踏面有 2 条斜裂纹, 其深度均为 6 mm, 两裂纹的距离为 70 mm。两个 EMAT 相距 380 mm, 接收 EMAT 与最近斜裂纹相距 250 mm。单个永磁体的长、宽和高分别为 3.9、2.4 和 0.9 mm, 曲折线圈匝数为 16, 每匝由 2 分裂导线组成。在检测裂纹时, 每采集一组数据,

两个 EMAT 均向裂纹所在方向平移 3 mm, 共采集了 50 组数据, 采样频率设置为 40 MHz。



图 12 表面波检测踏面裂纹的实物图

Fig. 12 Image of the tread crack detection by surface wave

采集无同步平均信号, 对比单频激励和巴克码激励下的 B 扫成像效果。图 13(a) 为以单一频率正弦脉冲串作为激励时得到的回波信号, 第 2 条斜裂纹回波被噪声淹没, 且端面回波的 SNR 为 19.85 dB。单次采集的单一频率激励对应的 B 扫成像如图 13(b) 所示。从图 13(b) 中可以看出, B 扫图像背景噪音较大, 图像分辨率较低且无法获取第 2 条斜裂纹的位置信息。

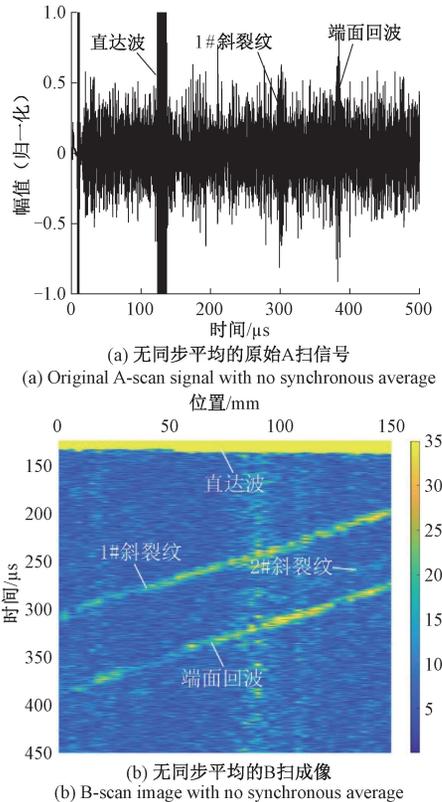


图 13 无同步平均单一频率脉冲串激励对应的 B 扫成像

Fig. 13 B-scan image of tone-burst excitation with no synchronous average

5.2 HHT 和 PCT 应用于钢轨踏面裂纹的 B 扫成像效果对比

对图 13(a) 的超声回波进行 HHT 处理, 得到的 EMD 分解结果如图 14 所示。由图 14 可知, EMD 分解得到的分量中, 出现了模式混叠现象, 并导致 EMD 分解失

效。这是因为信号中的噪声较大,从而导致筛分过程中极值点的选取,使得包络线拟合度降低。图 15 为分量 imf1 信号,由图 15 可知,缺陷波和端面回波均未被筛分出来。经 HHT 处理后重建的 B 扫成像,如图 16 所示。由图 16 可知,无同步平均的超声回波信号经 HHT 处理后,只有直达波,并不能有效获取缺陷波,故 HHT 很难应用于钢轨踏面裂纹的快速 B 扫成像检测。

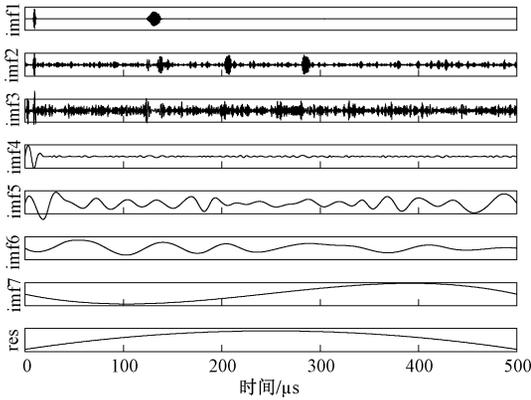


图 14 无同步平均 A 扫信号的 EMD 分解图
Fig. 14 EMD decomposition of A-scan signal with no synchronous average

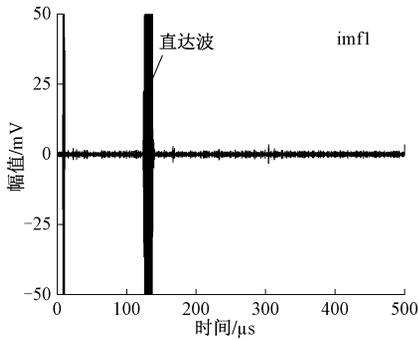


图 15 无同步平均 A 扫信号经 EMD 分解得到的 imf1 分量
Fig. 15 Imf1 component obtained by EMD decomposition of A-scan signal with no synchronous average

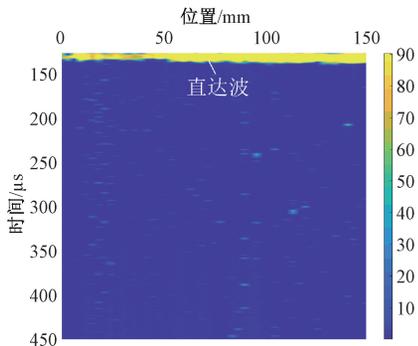
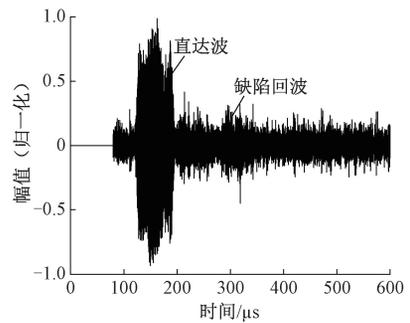


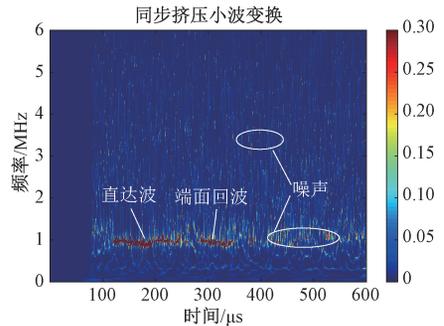
图 16 无同步平均单一频率脉冲串激励并经 HHT 处理后的 B 扫成像

Fig. 16 B-scan image of tone-burst excitation method after HHT and no synchronous average

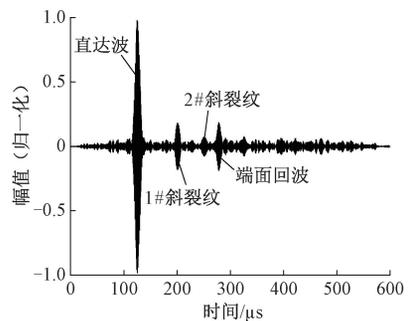
为得到分辨率更高和缺陷更为清晰的 B 扫图像,采用以正弦脉冲串为码元的 13 位巴克码作为激励信号,图 17(a)为无同步平均的 A 扫信号,由于巴克码激励信号的持续时间为 65 μs,导致了裂纹的反射回波和端面回波发生混叠,因此难以区分缺陷波和端面波。图 17(a)经 SWT 后得到如图 17(b)所示时频图。将图 17(a)中的信号进行 PCT 处理,处理结果如图 17(c),可大致地看到两条斜裂纹和端面的回波,其中端面波的 SNR 为 26.34 dB,由图 17(c)可知,噪声干扰仍然较大。经 PCT 处理后重建的 B 扫成像,如图 17(d)所示。对图 17(d)和图 13(b)进行比较,在图 17(d)中第 2 条斜裂纹开始显现,但由于 1 MHz 附近强噪声的存在,所以在 B 扫成像上,第 2 条裂纹的显现不明显。对于 1 MHz 附近强噪声,可以采用 SWT 预先滤除回波信号中心频率外的噪声。



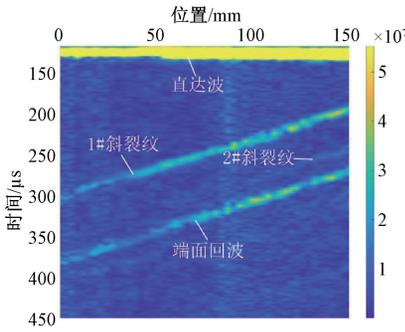
(a) 无同步平均的原始 A 扫信号
(a) Original A-scan signal with no synchronous average



(b) SWT 时频图
(b) Time-frequency spectrum of SWT

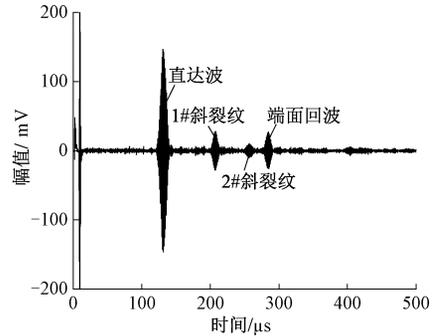


(c) 经旁瓣抑制后的脉冲信号
(c) Pulse compressed signal after side lobe suppression



(d) B-scan imagewith PCT procession and no synchronous average

图 17 无同步平均回波信号经脉冲压缩后对应的 B 扫成像
Fig. 17 B-scan images corresponding to no synchronous average after PCT procession



(c) 单一频率脉冲串激励和64次同步平均的A扫信号
(c) A-scan signal of tone-burst excitation with 64 synchronous averages

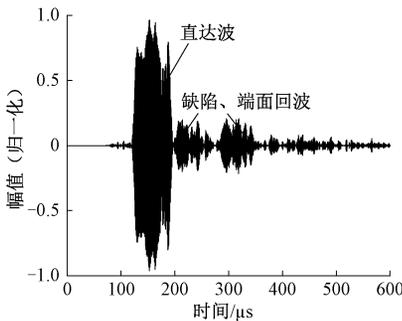
图 18 组合方法和单一频率脉冲串激励对应的 A 扫信号
Fig. 18 Original A-scan signals corresponding to the combination method and tone-burst excitation

5.3 PCT 和 SWT 组合方法在钢轨踏面裂纹表面波 B 扫成像中的应用

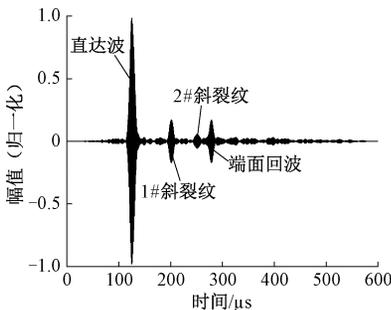
采用 PCT 和 SWT 的组合方法处理图 17(a) 中的信号,首先对图 17(a) 中的信号进行 SWT 处理,并提取图 17(b) 中的时频脊线,滤除 1 MHz 附近的强噪声,图 18(a) 为经 SWT 处理后的重构信号,端面波 SNR 为 22.13 dB,再对图 18(a) 中的信号进行 PCT 处理,结果如图 18(b) 所示。对图 18(b) 与图 17(c) 进行比较,可以明显地看出脉压后的噪声明显减少,图 18(b) 中端面波 SNR 为 33.16 dB,较图 17(c) 中的端面波 SNR 提高了 6.82 dB。图 18(c) 为单一频率脉冲串激励时并经 64 次同步平均后的 A 扫信号,其中端面波 SNR 为 30.4 dB。

由此可知,在无同步平均条件下,超声回波信号经 SWT 和 PCT 组合方法处理后的 SNR 相当于单一频率脉冲串激励并经 64 次同步平均。

经 SWT 和 PCT 组合方法处理后重建 B 扫图像,如图 19 所示。对比图 17(d) 与图 19 可知,经过 SWT 和 PCT 组合方法处理后,滤除了信号中心频率 1 MHz 附近的强噪声,从而降低了 B 扫图像的背景噪声,使得 B 扫图像上两条裂纹的清晰度得到了进一步的提高。



(a) SWT处理后的A扫信号
(a) A-scan signal after SWT procession



(b) 经旁瓣抑制后的脉压信号
(b) Pulse compressed signal after side lobe suppression

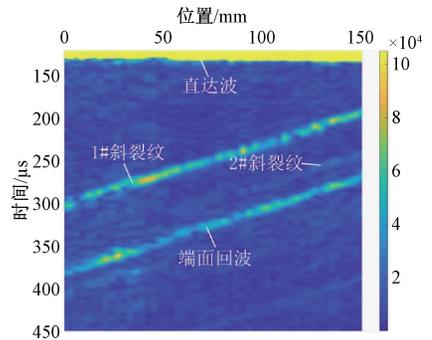


图 19 无同步平均时 SWT 和 PCT 组合方法对应的 B 扫成像
Fig. 19 B-scan images corresponding to SWT and PCT combination method and no synchronous average

当脉冲发射/接收仪 RITEC RPR-4000 的重复频率为 50 Hz 时,进行 64 次同步平均所需的时间为 1.28 s。在无同步平均条件下,超声回波信号经 SWT 和 PCT 组合方法处理后的 SNR 相当于单一频率脉冲串激励并经 64 次同步平均。

电脑硬件环境如下:CPU 为 Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20 GHz,内存为 16 G,操作系统为 Windows 10 64 位,数据处理软件为 MATLAB。采用 SWT 和 PCT 组合方法直接处理无同步平均回波信号,所需要

的单次采集时间为 0.02 s, SWT 和 PCT 处理时间分别为 0.25、0.18 s, 共需要 0.45 s。和单一频率脉冲串激励并经 64 次同步平均的方法对比, 能够缩短检测时间 0.83 s, 因此可以提高钢轨踏面裂纹检测效率。

6 结 论

本文提出了一种 SWT 和 PCT 的组合方法, 用于钢轨踏面裂纹电磁超声回波信号处理。分析了 HHT 方法和 SWT 和 PCT 组合方法下的信号降噪效果, 验证了基于 SWT 和 PCT 组合方法在钢轨踏面裂纹电磁超声表面波 B 扫检测中对 SNR 和图像清晰度有重要提升作用, 并得到了以下结论:

1) PCT 与 SWT 和 PCT 的组合方法在处理只含高斯噪声的信号时, 两者在提高 SNR 方面的效果相近, 但在处理含正弦脉冲形式噪声的信号时, SWT 和 PCT 的组合方法更加有效, 经 SWT 和 PCT 组合方法处理后, 相比于只进行 PCT 方法的回波信号 SNR 至少提高了 6.82 dB。

2) 由于单次采集的单一频率脉冲串激励对应的超声回波信噪比低, 导致 EMD 分解失效, 故 HHT 无法有效获取缺陷波。将 SWT 和 PCT 组合方法应用于回波信号处理, 能够提升回波的 SNR 和检测效率。和单一频率正弦脉冲串激励方式并结合多次同步平均降噪对比, 应用 SWT 和 PCT 组合方法处理单次采集的回波信号, 能够获得比 64 次同步平均更好的信噪比。

3) 为了能够通过钢轨踏面裂纹 B 扫图像获取裂纹的所在位置及其数量信息, 以巴克码为激励信号, 采用 SWT 和 PCT 组合方法处理无同步平均的原始 A 扫超声波信号, 重建得到 B 扫图像, 大部分背景噪声被滤除, 可以获得裂纹的位置信息, 为钢轨踏面裂纹快速检测中的超声回波信噪比低和 B 扫成像不清晰等难题提供一种新的信号处理方法。

参考文献

[1] ZHOU Y, WANG S, WANG T, et al. Field and laboratory investigation of the relationship between rail head check and wear in a heavy-haul railway[J]. *Wear*, 2014, 315(1-2): 68-77.

[2] 田贵云, 高斌, 高运来, 等. 铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(8): 1763-1780.

TIAN G Y, GAO B, GAO Y L, et al. Review of railway defect nondestructive testing and monitoring[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(8): 1763-1780.

[3] 孙斐然, 孙振国, 张文增, 等. 基于洛伦兹力机制的电磁超声发射换能器的建模与优化[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(6): 12-21.

SUN F R, SUN ZH G, ZHANG W Z, et al. Review of modeling method and optimum design of emat transmitters based on lorentz principl [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(6): 12-21.

[4] LU C, MEN P, LI L. An experimental study of EMAT ultrasonic surface waves modes in railhead [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2010, 33(3-4): 1127-1133.

[5] 时亚, 石文泽, 陈果, 等. 钢轨踏面检测电磁超声表面波换能器优化设计[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(8): 239-249.

SHI Y, SHI W Z, CHEN G, et al. Optimized design of surface wave electromagnetic acoustic transducer for rail tread testing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(8): 239-249.

[6] 门平, 董世运, 卢超, 等. 钢轨踏面低频超声表面波传播模式研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(3): 13-20.

MEN P, DONG SH Y, LU CH, et al. Research on low-frequency acoustic surface wave propagation mode in rail treads [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(3): 13-20.

[7] SHULL P J, PALMER S B, GYEKENYESI A L, et al. Transverse and longitudinal crack detection in the head of rail tracks using Rayleigh wave-like wideband guided ultrasonic waves [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2005, 5767: 70-80.

[8] 刘素贞, 王淑娟, 张闯, 等. 钢板电磁超声表面波的仿真分析及缺陷定量检测[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(1): 97-105.

LIU S ZH, WANG SH J, ZHANG CH, et al. Simulation analysis of electromagnetic acoustic surface wave of steel plate and quantitative defect detection[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(1): 97-105.

[9] TRUSHKEVYCH O, EDWARDS R S. Characterisation of small defects using miniaturised EMAT system [J]. *NDT & E International*, 2019, 107: 102140.

[10] 胡松涛, 石文泽, 卢超, 等. 钢轨踏面裂纹电磁超声

- 表面波同步挤压小波快速成像检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 35-46.
- HU S T, SHI W Z, LU CH, et al. Research on rapid imaging detection of electromagnetic ultrasonic surface wave synchrosqueezed wavelet for rail tread cracks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1): 35-46.
- [11] 何存富, 邓鹏, 吕炎, 等. 一种高信噪比电磁声表面波传感器及在厚壁管道检测中的应用[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 59-66.
- HE C F, DENG P, LYU Y, et al. A new surface wave emat with high snr and the application for defect detection in thick-walled pipes [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 59-66.
- [12] 张涛, 丁碧云, 赵鑫. 采用改进的希尔伯特黄变换的损伤检测特征提取方法[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(10): 16-23.
- ZHANG T, DING B Y, ZHAO X. A feature extraction method of defect detection using improved hilbert-huang transform[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(10): 16-23.
- [13] AMEZQUITA-SANCHEZ, PABLO J, ADELI, et al. Signal processing techniques for vibration-based health monitoring of smart structures [J]. Archives of Computational Methods in Engineering: State of the Art Reviews, 2016, 23(1): 1-15.
- [14] 付华, 刘公权, 邢亮. 基于同步挤压小波变换的故障行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 18-24.
- FU H, LIU G Q, XING L. Fault traveling wave ranging method based on synchrosqueezing wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 18-24.
- [15] LU SH Z, DONG H J, YU H L. Interlaminar damage assessment method of CFRP laminate based on synchrosqueezed wavelet transform and ensemble principal component analysis[J]. Composite Structures, 2021, 276, 114581.
- [16] 喻敏, 王斌, 王文波, 等. 基于同步挤压小波变换的电力系统时变谐波检测[J]. 电工技术学报, 2017, 32(S1): 50-57.
- YU M, WANG B, WANG W B, et al. Power system time-varying transient harmonics detection based on SWT [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 50-57.
- [17] O'DONNELL M. Coded excitation system for improving the penetration of real-time phased-array imaging systems[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 1992, 39(3): 341-351.
- [18] 石文泽, 黄祺凯, 卢超, 等. 编码压缩在钢板电磁超声 SH 导波检测中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2021: 1-14.
- SHI W Z, HUANG Q K, LU CH, et al. Application of compression technology in the steel plate detection with SH guided wave EMATs [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021: 1-14.
- [19] LAURETI S, RICCI M, MOHAMED M, et al. Detection of rebars in concrete using advanced ultrasonic pulse compression techniques [J]. Ultrasonics, 2018, 85: 31-38.
- [20] AN Y, WANG X, YUE B, et al. A novel method for natural gas pipeline safety online monitoring based on acoustic pulse compression [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 130(2): 174-181.
- [21] 宋寿鹏, 乔梦丽. 基于 NLFM Barker 编码的板材焊缝缺陷超声检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 246-254.
- SONG SH P, QIAO M L. Research on ultrasonic testing of plate weld flaw based on NLFM barker coded excitation method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(4): 246-254.
- [22] 刘素贞, 李礼, 蔡智超, 等. 非线性电磁超声对铝合金拉伸变形评价研究[J]. 声学学报, 2017, 42(1): 60-66.
- LIU S ZH, LI L, CAI ZH CH, et al. Evaluation of the tensile deformation of aluminum alloy using EMAT for nonlinear ultrasonic detection[J]. Acta Acustica, 2017, 42(1): 60-66.
- [23] XIE Y, LIU Z, YIN L, et al. Directivity analysis of meander-line-coil EMATs with a wholly analytical method[J]. Ultrasonics, 2017, 73: 262-270.
- [24] HAO K S, HUANG S L, WEI Z, et al. Modeling and finite element analysis of transduction process of electromagnetic acoustic transducers for nonferromagnetic metal material testing [J]. Journal of Central South

University, 2011, 18(3): 749-754.

- [25] DUTTON B, BOONSANG S, DEWHURST R J. Modelling of magnetic fields to enhance the performance of an in-plane EMAT for laser-generated ultrasound [J]. *Ultrasonics*, 2006, 44(8): 657-665.
- [26] ISLA J, CEGLA F. Coded excitation for pulse-echo systems [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 2017, 64(4): 736-748.
- [27] 周正干, 马保全, 孙志明, 等. 相位编码脉冲压缩方法在空气耦合超声检测信号处理中的应用 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(2): 48-54.
- ZHOU ZH G, MA B Q, SUN ZH M, et al. Application of phase coded pulse compression method to air-coupled ultrasonic testing signal processing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(2): 48-54.
- [28] 李汛江, 苏凡凡, 赵正予. 电离层探测仪回波能量积累算法 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(12): 3777-3783.
- LI X J, SU F F, ZHAO ZH Y. Echo energy accumulation algorithm of ionospheric detector [J]. *Journal of Central South University*, 2011, 42(12): 3777-3783.
- [29] RIHACZEK A W, GOLDEN R M. Range sidelobe suppression for barker codes [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1971, 7(6): 1087-1092.
- [30] DAUBECHIES I, LU J, WU H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool [J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2011, 30(2): 243-261.

作者简介



余丽婷, 2019 年于赣南师范大学科技学院获得学士学位, 现为赣南师范大学硕士研究生, 主要研究方向为电磁超声检测。

E-mail: 1200880015@gnnu.edu.cn

Yu Liting received her B. Sc. degree from Science and Technology College of Gannan Normal University in 2019. She is currently a master student at Gannan Normal University. Her main research interest is electromagnetic acoustic testing.



卢超(通信作者), 1995 年于江西师大获学士学位, 1998 年于中国科技大学获硕士学位, 2009 年于中国铁道科学研究院获博士学位, 现为南昌航空大学教授, 主要研究方向为超声检测及仪器。

E-mail: luchaoniat@163.com

Lu Chao (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jiangxi Normal University in 1995, received his M. Sc. degree from University of Science and Technology of China in 1998, and received his Ph. D. degree from China Academy of Railway Sciences in 2009. He is currently a professor at Nanchang Hangkong University. His main research interests include ultrasonic non-destructive testing and instrument design.



石文泽, 2009 年于内蒙古工业大学获得学士学位, 2011 年于中南大学获得硕士学位, 2017 年于中南大学获得博士学位, 现为南昌航空大学讲师, 主要研究方向为电磁超声检测。

E-mail: 70658@nchu.edu.cn

Shi Wenzhe received his B. Sc. degree from Inner Mongolia University of Technology in 2009, and received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Central South University in 2011 and 2017, respectively. He is currently a lecturer at Nanchang Hangkong University. His main research interest is electromagnetic acoustic testing.