DOI: 10.13382/j.jemi.B2002927

Barker 编码激励超声导波在断轨检测中的应用*

王好贞 杨 媛 魏小源 闫佳轩
(西安理工大学 自动化与信息工程学院 西安 710048)

摘 要:为增大钢轨中接收端超声导波信号幅度并提高超声导波辨识度,提出将编码激励技术应用到超声导波断轨检测系统中。系统在发射端采用持续时间较长的 13 位 Barker 编码信号激励超声换能器产生超声导波,在接收端采用匹配滤波方法对回波信号进行脉冲压缩。针对 1 m 长 60 型钢轨分别进行了仿真分析和实验验证,结果表明,实验结果与仿真结果具有很好的一致性,Barker 码激励经匹配滤波脉冲压缩后的信号幅度远远大于单脉冲激励接收信号幅度,前者是后者的 3 倍多;归一化后两者信号在时域上波形几乎完全重合,两者的信号相似度仿真与实验结果分别达到 99.39% 和 99.29%。研究结果表明,利用 Barker 码作为激励产生超声导波信号是可行的,并可应用于断轨检测中。

关键词:压电超声换能器;编码激励;脉冲压缩
中图分类号:TN911.72 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:510.50

Application of Barker code excited ultrasonic guided waves in broken rail detection

Wang Haozhen Yang Yuan Wei Xiaoyuan Yan Jiaxuan
(Department of Electronic Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to increase the amplitude of the ultrasonic guided wave (UGW) signal at the receiving end of the rail and improve the identification of the guided waves, the coded excitation technique is applied to UGW broken rail detection system in this paper. At the transmitters, the system uses a long duration 13-bit Barker-coded to generate UGW excitation signal. At the receivers, the matched filtering method is used to make pulsed compression of the echo signal. In this paper, the simulation analysis and experimental verification on 1 meter 60 type rail are carried out. The results show that the experimental results are in good agreement with the simulation results. The signal amplitude of Barker code excitation after pulsed compression by matched filtering is much higher than the received signal of single pulse excitation, compared with the received signal of the single pulse excitation, the amplitude of the Barker code excitation received signal increases to more than three times of that. The normalized waveforms of the two signals are almost completely coincident in the time domain, the similarity between the two signals in the simulation and experiment results is reached 99.39% and 99.29% respectively. The conclusion can be drawn that using Barker code as excitation to obtain UGW is feasible and the Barker code excited UGW can be applied in broken rail detection.

Keywords: piezoelectric ultrasonic transducer; coded excitation; pulsed compression

0 引 言

随着我国高速铁路事业的快速发展,无缝长轨线路得到了广泛应用,同时也对钢轨损伤检测的准确性、实时性等提出了较高要求[1-3]。在众多钢轨损伤检测方法中,由于超声导波检测技术采用机械波原理,故不易受电磁干扰、轨道电气参数等影响,且具有传播距离远、速度快、检测效率高等突出优势[4-5],适用于长距离钢轨损伤检测。但由于超声导波在钢轨中的衰减,往往导致接收到

收稿日期:2020-01-15 Received Date: 2020-01-15
*基金项目:国家自然科学基金(51477138)、西安市科技计划项目(2017080CG/RC043(XALG009))资助

的超声导波信号幅度小且频散严重[6]，环境噪声过大时，导波信号甚至可能完全被噪声淹没。

解决这一问题的方法通常是提高发射信号幅度。然而，提高发射信号幅度的方法受限于超声换能器承受的极限电压值且会加大硬件驱动电路的设计难度。

1974 年首次将编码激励应用到医学超声成像中，近几十年来，编码激励技术已经广泛地应用到 B 超成像、彩色血流成像以及组织、造影谐波成像等临床医学超声检测中[7-9]。在众多医学超声检测研究中表明，采用编码激励技术可以延长编码信号激励换能器的发射时间，从而提高信噪比[10-11]。文献[10]在 10 MHz 眼科超声成像中实现编码激励技术的应用，在相同发射电压条件下，采用编码激励得到的回波信噪比对比单脉冲激励提高了 9.7 dB；文献[11]将编码激励应用到长骨检测中，与传统单脉冲激励相比，采用 Barker 编码激励使得接收信号幅度增大 6.64 dB。上述编码激励研究均针对医学应用开展，但编码激励在超声导波钢轨检测中未见相关研究，因此，为解决钢轨中接收到超声导波信号幅度小，频散严重以及易受噪声影响问题，本文探索将激励编码技术应用于工业超声导波断轨检测系统中。

目前较为常用的编码方式有 Barker 码、Golay 码以及线性调频序列(Chirp 信号)等。其中，Chirp 信号为调频信号，调制方式较为简单，容易受到环境噪声的干扰，在发射时要求多级脉冲发射以便控制其频谱，增大了硬件设计的复杂度，且发射到接收处理过程相对复杂[12-13]，脉冲压缩后具有较大的旁瓣；Golay 码和 Barker 码都为二进制编码，发射方式相比于 Chirp 信号更为简单，Golay 互补序列对虽然可以完全消除由于脉冲压缩产生的旁瓣，达到理想的脉冲压缩效果，但其需要两次发射，影响解码效果，而单次发射的 Barker 码设计相对容易[14-17]，且在相同长度的二进制序列中其自相关函数的主旁瓣比最高，更能够适用于断轨检测，具有更广的应用范围。

1　超声编码激励系统设计

1.1　超声编码断轨检测原理

超声导波损伤检测法利用安装在钢轨轨腰上的超声换能器将超声波射入钢轨中，形成沿钢轨长度方向传播的超声导波来进行检测，此方法具有成本低、安装维护简单等优势。本文设计的超声编码激励系统如图 1 所示，系统由发射端、接收端和钢轨信道组成，发射换能器与接收换能器位于钢轨轨腰处。首先，在 ARM 微处理器中确定发送码元的位数与周期数，发射端通过激励电路驱动换能器工作以激发超声波。超声导波经过钢轨传输后在接收端接收，使回波信号经匹配滤波处理后压缩成单峰信号，此输出信号即为脉冲压缩信号。通过分析脉冲压缩信号，就可判定固定距离下接收端与发射端之间的钢轨损伤情况。

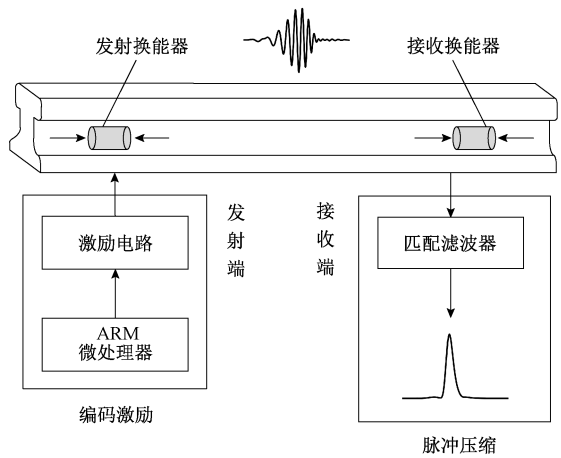


图 1　超声编码激励系统

Fig. 1　Ultrasonic coding excitation system

1.2　激励编码方式

本文选用 Barker 码作为编码方式。Barker 码是一种最常用的单次发射二进制序列，一个 N 位 BC(barker code)表示为：

$$A[N]=[a_0,a_1,\cdots,a_{N-1}],a_i\in\{-1,+1\} \tag{1}$$

自相关函数为：

$$\Psi_{AA}[n]=\begin{cases}N, & n=0\\ 0\text{ 或 }1, & n\neq 0\end{cases} \tag{2}$$

由式(2)可知，BC 的自相关峰值为 N，且旁瓣在±1之间，N=2,3,4,5,7,11,13。

通常采用峰值旁瓣水平(peak sidelobe level，PSL)来权衡脉冲压缩的距离旁瓣抑制效果，其定义式为：

$$PSL=10\log\frac{\text{旁瓣峰值幅度}}{\text{主瓣峰值幅度}} \tag{3}$$

结合式(2)和(3)可得，不同位数下 Barker 码序列的 PSL 如表 1 所示。

表 1　目前已知的 Barker 码序列及其 PSL

Table 1　Barker code sequences and their PSL

位数	Barker 码	PSL/dB
2	1 1;1 -1	-3.01
3	1 1 -1	-4.77
4	1 1 1 -1;1 1 -1 1	-6.02
5	1 1 1 -1 1	-6.99
7	1 1 1 -1 -1 1 -1	-8.45
11	1 1 1 -1 -1 -1 1 -1 -1 1 -1	-10.41
13	1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 -1 1 -1 1	-11.14

由表 1 可知，相比于其他位数，13 bit 的 Barker 码具有最低的 PSL，表明其脉冲压缩旁瓣抑制效果最好，因

此,本系统选择 13 bit BC 作为激励信号。

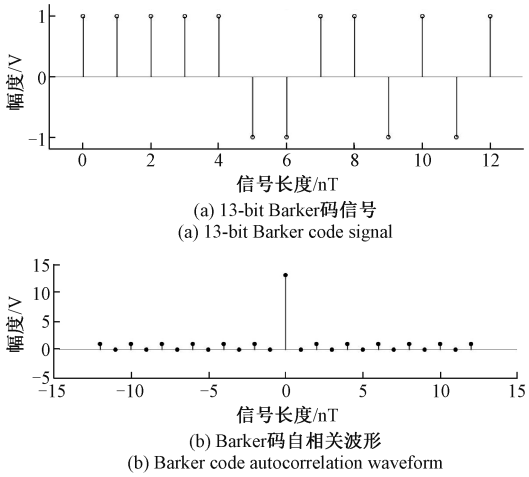


图 2　13bit Barker 码信号

Fig. 2　13-bit Barker code signal

13 bit Barker 码信号波形如图 2 所示。从图 2(b)可以看出,BC 具有很好的自相关特性,主瓣幅度是旁瓣的 13 倍,可以提供良好的检测分辨率,便于与随机的数字信息相区别,易于识别。

实际中,BC 不能直接作为激励信号,因为二进制序列具有无限的带宽[18],因此本文采用二进制相移键控(BPSK)调制方案在发射端发射调制后的 13 bit Barker 码作为激励信号。

BPSK 调制可以表示为正弦信号与一系列狄拉克函数的卷积:

$$s(t) = s_a(t) * \sum_{0}^{N-1} (a_n\delta(t-nkT)), 0 \leqslant t \leqslant (N-1)kT \tag{4}$$

式中:$s_a(t)$ 是周期为 k 的正弦信号,$0 \leqslant t \leqslant kT$;$a_n$ 是 N 位 BC 的二进制码元。

考虑到正弦波具有频率单一、能量集中、载噪比高、单次谐波少、不易失真的特点,因此本文采用相同频率的正弦波调制发射信号。但由于超声导波的频散特性,使得导波信号的波包随着传播距离的不断拉长,会降低检测信号的信噪比和超声导波辨识度[19-20]。

为降低频散特性对多次谐波的影响,本文采取对正弦载波进行加窗处理。汉宁窗(Hanning window),也称升余弦窗,可表示为:

$$\omega_{Hn}(n) = 0.5\left[1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)\right]R_N(n) \tag{5}$$

式中:$R_N(n)$ 为矩形窗(Rectangle window);N 为窗口长度;$n \in \left[-\frac{N-1}{2}, \frac{N-1}{2}\right]$。其频谱函数为:

$$W_{Hn}(e^{j\omega}) = FT[W_{Hn}(n)] = W_{Hng}(\omega)e^{-j\frac{N-1}{2}\omega} \tag{6}$$

式中:$W_{Hng}(\omega)$ 为幅度函数,当 $N \gg 1$ 时,$N-1 \approx N$。

$$W_{Hng}(\omega) = 0.5W_{Rg}(\omega) + 0.25\left[W_{Rg}\left(\omega + \frac{2\pi}{N}\right) + W_{Rg}\left(\omega - \frac{2\pi}{N}\right)\right] \tag{7}$$

由式(7)可知,汉宁窗幅度函数 $W_{Hng}(\omega)$ 由 3 部分相加,旁瓣相消,使能量更集中在主瓣。汉宁窗与加窗后的正弦波波形如图 3 所示,图 3(a)为单一汉宁窗,图 3(b)为加窗后的 8 个周期正弦波。通过对 Barker 码加窗处理,可以获得平滑的频谱,减少频谱泄露,从而加快旁瓣的衰减[21]。

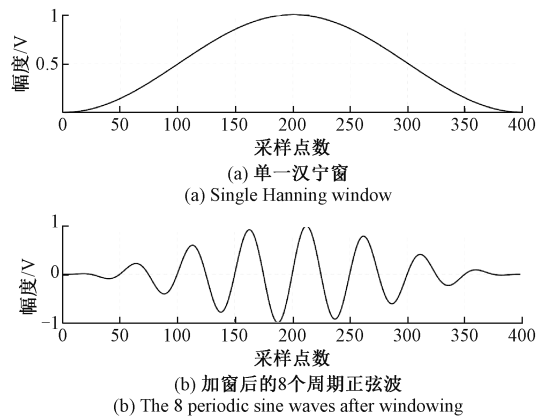


图 3　汉宁窗与加窗后的正弦波波形

Fig. 3　Hanning window and sine wave waveform after windowing

1.3　脉冲压缩方法

脉冲压缩技术常用于无线电通信系统信号处理中,发射端通常发射宽编码脉冲以提高信号平均功率,增大传输距离,在接收端采用线性滤波器对接收回波进行脉冲压缩,以获得窄脉冲信号,使雷达提高检测能力的同时又不降低系统的距离分辨力[22]。

在所有线性滤波器中,匹配滤波器输出峰值信噪比最大,它只取决于输入信号能量和白噪声功率谱密度,而与输入信号形状和噪声分布规律无关。匹配滤波器可用于识别信号,并将接收到的信号压缩成单峰信号,故本文选择匹配滤波[23-24]作为脉冲压缩的一种方法。

图 1 所示的超声编码激励系统可以看作为一个线性系统。设该滤波器的传递函数为 $H(\omega)$,冲激响应为 $h(t)$。当滤波器输入包括激励信号 $s(t)$ 和噪声 $n(t)$ 两部分时,输出 $y(t)$ 也应包含输出信号 $s_o(t)$ 和输出噪声 $n_o(t)$ 两部分,即:

$$y(t) = s_o(t) + n_o(t) \tag{7}$$

$$s_0(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega)S(\omega)e^{j2\pi\omega t}d\omega \tag{8}$$

式中:$S(\omega)$ 为 $S(t)$ 的傅里叶变换。

根据匹配理论,匹配滤波器的传输特性为:

$$H(\omega) = kS^*(\omega)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi\omega t} \tag{9}$$

式中：k 为幅度归一化常数；$S^*(\omega)$ 为 $S(\omega)$ 的复共轭。

对 $H(\omega)$ 做快速傅里叶逆变换(IFFT)，可得滤波器的冲激响应，即：

$$h(t) = ks^*(t_o - t) \tag{10}$$

由式(10)可知，匹配滤波器的冲激响应 $h(t)$ 是激励信号 $s(t)$ 的镜像 $s(-t)$，即在时间轴上平移了 t_o。

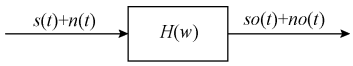


图 4 匹配滤波器

Fig. 4 The matched filtering

为获得脉冲压缩信号 $c(t)$，通常使响应信号 $s_o(t)$ 与激励信号 $s(t)$ 做互相关，此过程称为匹配滤波，它表示为：

$$c(t) = \int S(\omega)H(\omega)S^*(\omega)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi\omega t}\mathrm{d}\omega = \int |S(\omega)|^2 H(\omega)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi\omega t}\mathrm{d}\omega \tag{11}$$

式中：* 表示复共轭，$|S(\omega)|^2$ 表示激励信号 $s(t)$ 自相关函数的傅里叶变换。

2 算法仿真

本文在 Simulink 平台上建立 Barker 编码仿真模型。如图 4 所示，模型主要包括信号发射部分、信道模型部分和匹配滤波部分。仿真分别采用单脉冲激励和 13 bitBarker 码激励模拟发射信号，两者信号中心频率均为 35 kHz，采样频率为 12.5 MHz，且每个码元均用 8 个周期正弦波表示。

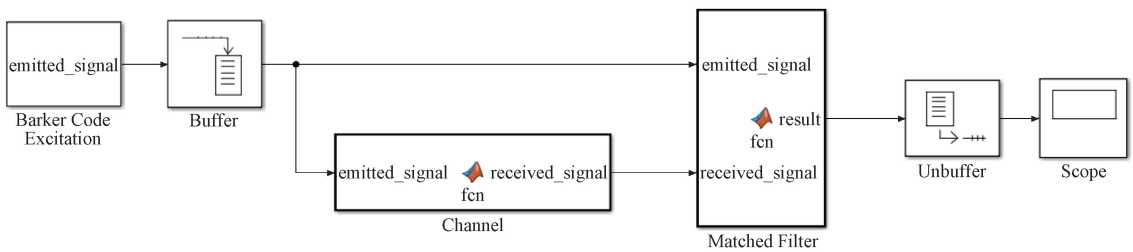


图 5 Simulink 仿真模型

Fig. 5 Simulink simulation model

在通信系统中，由于信号的传输受多径效应[25]影响，接收端信号通常由折射、反射和直射几种信号叠加而成。本文的通信信道是“工”字型钢轨，超声导波在钢轨传输过程中受介质及其杂质等因素干扰，会产生反射、直射，因此将钢轨抽象为一个多径衰落信道。在 Simulink 中，将发射信号经幅度缩减、延时处理再叠加到发射信号上，来模拟超声导波在实际信道中衰减和反射的传输过程。

仿真得到的单脉冲激励接收信号和 Barker 码激励接收信号波形如图 5 所示。从图 5(a)可以看出，单脉冲激励的接收信号最大幅值约为 0.52 V，图 5(b)可以看出，Barker 码激励接收信号最大幅值约为 1.70 V，相比于单脉冲激励，Barker 码激励的接收信号幅值增大了 3 倍。这是由于编码激励信号持续的时间更长，使得超声信号携带的能量增大，因此接收信号的幅度更大。

仿真后的 Barker 码接收信号与匹配滤波器卷积后，得到解码后的脉冲压缩信号，波形图如图 6 所示。由图 6 可知，调制后的 Barker 码经信道传输后，激励信号与接收信号做互相关运算，主瓣峰值远远大于单脉冲激励接收信号的峰值，匹配滤波器在进行脉冲压缩时，能够最大限度地提高输出信号的信噪比。图 6 方框所示波形并非互相关结果中的旁瓣，而是在钢轨信道的多径效应影响下，经过一段时间时延和更大的衰

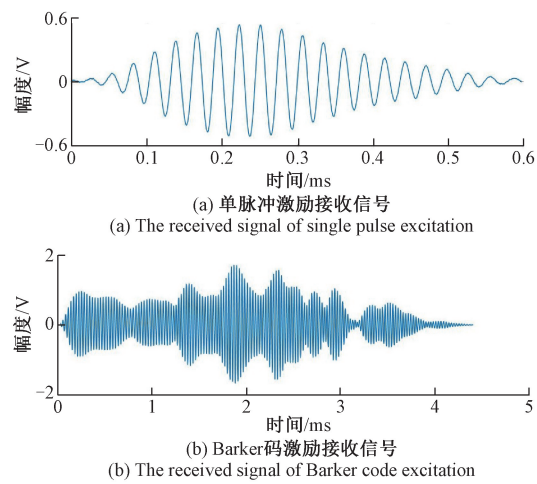


图 6 仿真得到的单脉冲激励接收信号和 Barker 码激励接收信号波形

Fig. 6 The received signal of single pulse excitation and Barker code excited in simulation

减后接收到的第二到达波，此波在匹配滤波后表现为一个峰值较小的峰，且位于第一最高峰之后，与第 1 峰之间的长度即为该延时。

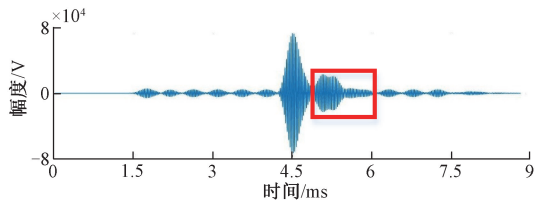
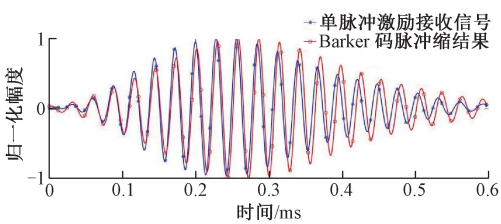


图 7　仿真匹配滤波脉冲压缩结果

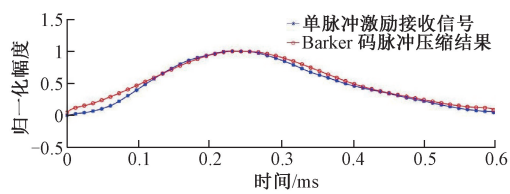
Fig. 7　The results of matched filtering pulse compression in simulation

将仿真的单脉冲激励接收信号与 Barker 码脉冲压缩主瓣进行幅度归一化数据处理，两者信号相似度，波形与上包络对比如图 8 所示。从图 8(a)可以看到，Barker 码激励得到的导波波形与单脉冲激励得到的导波波形两者信号整体形状几乎完全重合。如图 8(b)所示，取两者上包络进行比较，计算出两者相似度为 99.39%。这说明可以利用 Barker 编码的超声信号作为激励，在钢轨中产生接收信号。再通过匹配滤波器对接收信号进行脉冲压缩，从而得到超声导波信号。



(a) 单脉冲激励接收信号与Barker码脉冲压缩结果幅度归一化波形对比

(a) Comparison of amplitude normalized waveform between Single pulse excitation received signal and Barker code pulse compression result



(b) 单脉冲激励接收信号与Barker码脉冲压缩结果幅度归一化波形与上包络对比

(b) Comparison of amplitude normalized waveform between Single pulse excitation received signal and Barker code pulse compression result in simulation

图 8　仿真单脉冲激励接收信号与 Barker 码脉冲压缩结果幅度归一化波形与上包络对比

Fig. 8　Comparison of amplitude normalized waveform and upper envelope between single pulse excitation received signal and Barker code pulse compression result in simulation

3　钢轨实验

为了进一步验证编码激励的有效性和可靠性，在 1 m 钢轨上进行测试实验。钢轨实验平台如图 9 所示，采用一发一收机制，换能器安装于钢轨轨腰处，发射端利用任意波形发生器 AFG3022C 来激励夹心式压电超声换能器发射超声导波，超声导波经过钢轨传输，在接收端使用示波器 DPO2024B 采集并保存接收数据。1 m 钢轨实验条件与仿真条件相同，码型为 13 bit Barker 码激励，信号中心频率采用 35 kHz 正弦波调制，采样频率为 12.5 MHz，每位码元表征周期数为 8。

图 9　1 m 钢轨实验平台

Fig. 9　1 m rail test platform

首先，从发射端角度分析 BC 的自相关特性。发射端 Barker 码自相关波形如图 10 所示。由图 10 可知，Barker 码自身具有较高的自相关函数峰值和较低的旁瓣特性，能够在信道传输过程中取得较高的传输增益，抑制噪声干扰。采用 Barker 编码激励超声导波，可以有效地提高接收信号的检测分辨率和超声导波辨识度，适用于断轨检测。

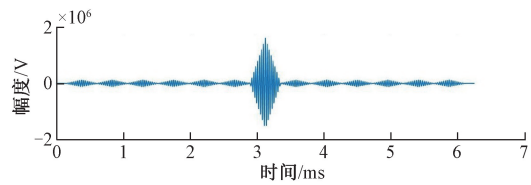
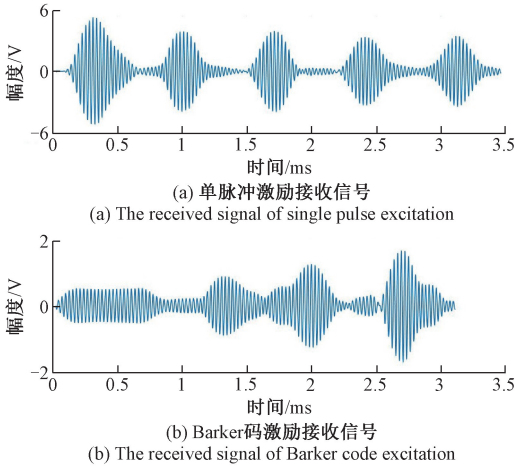


图 10　Barker 码自相关实验波形

Fig. 10　The experimental waveform of Barker code autocorrelation

实验得到的单脉冲激励接收信号和 Barker 码激励接收信号波形如图 11 所示。由图 11(a)可知，单脉冲激励的接收信号最大幅值约为 0.52 V，由图 11(b)可以看出，Barker 码激励接收信号最大幅值约为 1.71 V，Barker 码

接收信号幅度大于单脉冲接收信号，与图 6 仿真结果一致。



(a) 单脉冲激励接收信号
(a) The received signal of single pulse excitation

(b) Barker码激励接收信号
(b) The received signal of Barker code excitation

图 11　实验得到的单脉冲激励接收信号和 Barker 码激励接收信号波形

Fig. 11　The received signal of single pulse excitation and Barker code excited in experimental

对图 11(b)进行匹配滤波压缩，得到结果如图 12 所示。从图 12 可以看到，压缩信号的幅度远远大于图 11(a)单脉冲激励接收信号幅度，与仿真结果一致，采用编码激励和脉冲压缩技术，可以有效地增大接收端超声导波信号幅度。同样，与图 7 仿真结果类似，除主峰外，红框内均为钢轨中反射波互相关结果，这是由于 1 m 钢轨长度太短，超声导波反射次数增多，使得回波叠加到接收信号上。在长距离钢轨上随着传播距离的增加，反射波能量将逐渐减小，从而降低回波对旁瓣的影响。

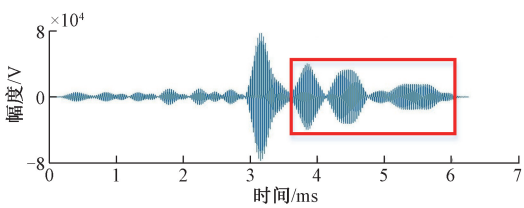
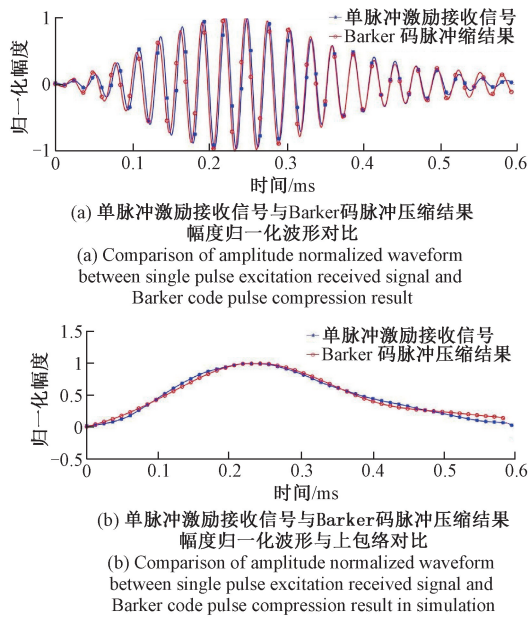


图 12　实验匹配滤波脉冲压缩结果

Fig. 12　The results of matched filtering pulse compression in experimental

为观察信号恢复效果，将单脉冲接收信号和脉冲压缩信号进行归一化数据处理，实验波形与上包络对比如图 13 所示。从图 13(a)可以看出，匹配滤波后得到的压缩信号和单脉冲激励信号完全重合。计算图 13(b)两者信号上包络相似度达到 99.29%，Barker 码接收信号压缩效果很好。实验结果与图 8 仿真结果有很好的一致性，充分说明可以将 Barker 码激励超声导波应用于断轨检测中。



(a) 单脉冲激励接收信号与Barker码脉冲压缩结果幅度归一化波形对比
(a) Comparison of amplitude normalized waveform between single pulse excitation received signal and Barker code pulse compression result

(b) 单脉冲激励接收信号与Barker码脉冲压缩结果幅度归一化波形与上包络对比
(b) Comparison of amplitude normalized waveform between single pulse excitation received signal and Barker code pulse compression result in simulation

图 13　实验单脉冲激励接收信号与 Barker 码脉冲压缩结果幅度归一化波形与上包络对比

Fig. 13　Comparison of amplitude normalized waveform and upper envelope between single pulse excitation received signal and Barker code pulse compression result in experimental

4　结　论

本文针对超声导波在钢轨信道传输过程中接收信号幅度小且频散严重问题，采用 Barker 编码激励方式激励超声导波，并选择匹配滤波作为脉冲压缩的一种解码方法来提高接收信号功率，增大接收信号幅度。本文采用仿真与实验相结合的方式对比传统单脉冲激励和 Barker 编码激励。首先，在 Simulink 中搭建 Barker 编码仿真模型，用发射信号幅度缩减、延时变化来模拟实际钢轨信道。仿真结果表明，匹配滤波脉冲压缩后的信号幅度远远大于单脉冲激励接收信号幅度，且相比于单脉冲激励接收信号，Barker 码激励接收信号幅值增大了 3 倍。将两者信号进行归一化数据处理后，时域波形几乎完全一致，相似度为 99.39%。这说明可以利用 Barker 编码的超声信号作为激励，在钢轨中产生接收信号。再通过匹配滤波器对接收信号进行脉冲压缩，从而得到导波信号。随后，本文采用一发一收机制进一步在 1 m 钢轨中进行实验验证。实验结果表明，压缩信号幅度同样远远大于单脉冲激励接收信号幅度，且归一化后的两者信号时域波形大体完全重合，相似度达到 99.29%，实验结果与仿真结果有很好的一致性，充分说明采用编码方式激励超声导波的有效性。

采用 Barker 编码激励方式激励超声导波,可以在不提高激励电压的前提下,获得大幅度的接收信号,提高信号信噪比,增大信号传播距离,提供较高的检测分辨率,便于与随机数字信息相区别,从而提高钢轨中超声导波功率传输效率。

参考文献

[1] WEI X Y, YANG Y, YU N M. Research on broken rail real-time detection system for ultrasonic guided wave [C]. International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, IEEE, 2017: 1-4.

[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.
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.

[3] 马新娜,施文锐. 高速列车状态监测大数据的预警可视化分析研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(7):21-27.
MA X N, SHI W R. Research on visual analysis of condition monitoring big data for high speed train [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 39(7): 21-27.

[4] YUAN L, YANG Y, HERNÁNDEZ Á, et al. Feature extraction for track section status classification based on UGW signals[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1225.

[5] WU J J, TANG Z F, LU F Z, et al. Ultrasonic guided wave focusing in waveguides with constant irregular cross-sections[J]. Ultrasonics, 2018(89): 1-12.

[6] YAO W Q, SHENG F W, WEI X Y, et al. Propagation characteristics of ultrasonic guided waves in continuously welded rail [J]. Modern Physics Letters B, 2017, 31(19-21): 174005.

[7] LAMBOUL B, BENNETT M, ANDERSON T, et al. Basic considerations in the use of coded excitation for color flow imaging applications [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(4): 727-737.

[8] ZHAO H, MO L, GAO S. Barker-coded ultrasound color flow imaging: Theoretical and practical design considerations [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2007, 54(2): 319-331.

[9] 谷金宏,万明习,王素品,等. 基于调频信号发射的超声造影剂谐波成像方法[J]. 声学学报, 2006, 31(3): 240-246.
GU J H, WAN M X, WANG S P, et al. Ultrasound contrast agent harmonic imaging method based on frequency-modulated signal excitation[J]. Acta Acustica, 2006, 31(3): 240-246.

[10] 刘 凯,高上凯. 编码激励超声成像系统中二进制最优编码序列的研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2007, 26(1): 42-47.
LIU K, GAO SH K. Study of optimal binary sequences in ultrasound imaging system using coded excitation [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2007, 26(1): 42-47.

[11] 张慧琳,他得安. 长骨中编码激励超声导波的方法研究[J]. 声学技术, 2013, 32(6): 143-144.
ZHANG H L, TA D AN. Code excited ultrasonic guided wave in long bones [J]. Technical Acoustics, 2013, 32(6): 143-144.

[12] KANG J, KIM Y, LEE W, et al. A New Dynamic complex baseband pulse compression method for chirp-coded excitation in medical ultrasound imaging [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2017, 64(11): 1698-1710.

[13] 郑阳,何存富,吴斌. Chirp 信号及其在超声导波检测中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(3): 552-558.
ZHENG Y, HE C F, WU B. Chirp signal and its application in ultrasonic guided wave inspection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(3): 552-558.

[14] 张慧琳,宋小军,他得安. Barker 码激励超声导波在长骨检测中的应用[J]. 声学学报, 2014, 39(2): 257-263.
ZHANG H L, SONG X J, TA D AN. Application of Barker code excited ultrasonic guided waves to long bone detection[J]. Acta Acustica, 2014, 39(2): 257-263.

[15] ZHANG S Q, ZHOU X Q, LIU S K, et al. Research on barker coded excitation method for magneto-acoustic imaging[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2018(39): 169-176.

[16] FU J, WEI G, HUANG Q H, et al. Barker coded excitation with linear frequency modulated carrier for ultrasonic imaging[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2014(13): 306-312.

[17] SONG P F, URBAN M W, MANDUCA A, et al. Coded Excitation Plane Wave Imaging for Shear Wave Motion Detection [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2015, 62(7): 1356-1372.

[18] LIN J, HUA J D, ZENG L, et al. Excitation waveform design for lamb wave pulse compression [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, 63(1): 165-177.

[19] 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.
XU X N,GUO B Q,YU Z J,et al. Semi-analytical finite element method for calculating dispersion curves of ultrasonic guided waves in a rail[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2014,35(10):2392-2398.
[20] XU K L, MINONZIO J, TA D A, et al. Sparse SVD method for high-resolution extraction of the dispersion curves of ultrasonic guided waves[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016,63(10):1514-1524.
[21] 张鸿博,蔡晓峰,鲁改凤. 基于双窗全相位 FFT 双谱线校正的电力谐波分析[J]. 仪器仪表学报,2015,36(12):2835-2841.
ZHANG H B,CAI X F,LU G F. Double-spectrum-line correction method based on double-window all-phase FFT for power harmonic analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2015,36(12):2835-2841.
[22] 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.
[23] 李绍兴,陈昕,张天炯,等. 编码激励超声多普勒系统分辨率性能分析[J]. 电子测量技术,2017,40(3):163-167.
LI SH X, CHEN X, ZHANG T T, et al. Resolution analysis of fully digtal ultrasound Doppler system using coded excitation [J]. Electronic Measurement Technology,2017,40(3):163-167.
[24] 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.
[25] 郭铁梁,张智勇,张琳. 水声信道相干多径特性仿真研究[J]. 通信技术,2016,49(7):799-806.
GUO T L, ZHANG ZH Y, ZHANG L. Simulation on coherent multipath characteristic for underwater acoustic channel[J]. Communications Technology,2016,49(7):799-806.

作者简介

王好贞,2017 年于陕西理工大学获得学士学位,现为西安理工大学硕士研究生,主要研究方向为超声导波检测。
E-mail:m13227057956@163.com

Wang Haozhen received her B. Sc. degree from Shaanxi University of Technology in 2017. Now she is a M. Sc. student in Xi'an University of Technology. Her main research interest is ultrasonic guided wave detection.

杨媛(通信作者),分别在 1997 年、2000 年和 2004 年于西安理工大学获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为西安理工大学教授、博士生导师,主要研究方向为数模混合集成电路设计、轨道交通电路系统设计。
E-mail:yangyuan@xaut.edu.cn

Yang Yuan(Corresponding author) received the B. Sc., M. Sc., and Ph. D. degrees from Xi'an University of Technology in 1997, 2000 and 2004, respectively. Now she is a professor at Xi'an University of Technology. Her main research interests include digital-analog mixed integrated circuit design and the design of track circuit systems.

魏小源,2012 年于西北师范大学获得学士学位,2015 于西安理工大学获得硕士学位,现为西安理工大学博士研究生,主要研究方向为长距离超声检测。
E-mail:wxy@stu.xaut.edu.cn

Wei Xiaoyuan received the B. Sc. degree from Northwest Normal University in 2012 and M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2015, respectively. Now he is a Ph. D. candidate at Xi'an University of Technology. His main research interests are ultrasonic guided wave detection and structural health monitoring.

闫佳轩,2018 年于南京工业大学获得学士学位,现为西安理工大学硕士研究生,主要研究方向为超声导波检测钢轨信道建模。
E-mail:m15895929565@163.com

Yan Jiaxuan received his B. Sc. degree from Nanjing Tech University in 2018. Now he is a M. Sc. candidate at Xi'an University of Technology. His main research interest is modeling of ultrasonic guided wave detection rail channel.