

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2104658

脉冲压缩的木材空气耦合超声检测研究*

王 军 李强鑫 吴 寅 顾佳健
(南京林业大学信息科学技术学院 南京 210037)

摘 要:为解决木材和空气介质之间声阻抗不匹配引起超声波衰减大,导致检测信号的信噪比低、测量精度不高等问题,本文将相位编码脉冲压缩技术应用到木材空气耦合超声检测系统。采用巴克码序列作为相位编码方式,分析了脉冲压缩激励信号产生和接收信号经互相关匹配滤波器后解调检测原理。以有节子和裂纹缺陷的木材作为实验对象,通过单点扫描对比缺陷处与非缺陷处检测信号的差异,最后使用 C 扫描对木材缺陷检测精度进行定量分析。结果表明,相比正弦激励信号,采用 13 位巴克码作为编码激励信号可使检测信号的信噪比提高了 9. 12 dB,C 扫描结果对节子型缺陷定量识别精度为 90%,且能有效检测节子中宽度为 1 mm 的裂纹。验证了基于脉冲压缩的木材空气耦合超声检测无需与被测材料接触,也能够有效提高木材缺陷识别能力。

关键词: 木材缺陷;空气耦合;超声检测;脉冲压缩;编码激励

中图分类号: TB553 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510. 40

Air-coupled ultrasonic testing of wood based on pulse compression technology

Wang Jun Li Qiangxin Wu Yin Gu Jiajian
(School of Information Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: In order to solve the problem of the acoustic impedance mismatch between wood and air medium and the large attenuation of ultrasonic. These are the reasons that the signal-to-noise ratio of the detection signal is low and the measurement accuracy is not high. The phase coded pulse compression technology was applied to the air coupled ultrasonic detection of wood in this paper. Buck code sequence was selected as phase coding sequence, and the principle of generating and receiving signal demodulation of impulse compression excitation signal was detailed. The defect wood was used as the experimental object, and the difference of the detection signal between the defect and the non-defect was compared by single point scanning testing. Then the accuracy of wood defect detection was quantitatively analyzed by C-scan experiments. The results show that the signal-to-noise ratio of the detection signal is improved by 9. 12 dB when 13-bit buck code is used as the coding excitation signal, compared with sinusoidal excitation signal. The quantitative recognition accuracy of the defect for the node is 90% by C-scan results. The crack with width of 1 mm in the node can be detected effectively. These show that the application of pulse compression technology to the air coupled detection of wood can effectively improve the wood defect identification ability.

Keywords: wood defects; air-coupled; ultrasonic testing; pulse compression; coded excitation

0 引 言

木材作为一种天然的可再生材料,其生长过程中会

不可避免地产生各种缺陷^[1]。如果不能发现木材中的缺陷并加以处理,则会导致加工后的产品价值大大降低并存在一定的安全隐患。因此,如何准确识别木材中存在的缺陷,提高木材利用率,一直是研究的热点^[2-4]。

收稿日期: 2021-08-18 Received Date: 2021-08-18

* 基金项目: 国家自然科学基金(31700478,32171788)、江苏省高校优秀中青年教师和校长境外研修计划(2019070)、南京林业大学自制实验教学仪器项目(2021017)资助

超声检测技术具有无辐射、成本低等特点,是目前进行木材缺陷检测的有效方法^[5-7]。传统超声检测需要传感器与测试件接触,且需要在测试件表面涂抹大量耦合剂,造成表面污损等缺陷,本文采用空气耦合超声检测技术^[8]。目前,该技术已在金属检测、复合材料检测等领域得到了应用^[9-10]。但是木材检测不同于金属等其他材料的检测,木材作为一种各向异性的生物有机材料,会对高频超声波产生散射和强烈的衰减^[11]。这导致了检测信号信噪比较低,缺陷检测精度较差,限制了空气耦合检测技术在木材领域中的应用。而脉冲压缩技术在雷达及医学领域的成功应用^[12-14],为木材空气耦合超声检测中不提高瞬时峰值功率的前提下,解决检测信号信噪比低、缺陷检测精度差等问题提供了有效的参考。

本文介绍了基于脉冲压缩方法的木材空气耦合超声检测系统的构成,并对脉冲压缩的原理及实现进行介绍。通过实验探讨了不同巴克码编码信号在木材检测中对脉冲压缩结果的影响。最后,以带有缺陷的木材作为实验对象,对比了缺陷和非缺陷处检测信号的差异,并采用 C 扫描成像进行定量分析,验证了相位编码脉冲压缩技术在木材空气耦合超声无损检测中的有效性。

1 脉冲压缩的空气耦合超声检测原理

1.1 木材空气耦合超声检测系统构成

本文设计了如图 1 所示的脉冲压缩的木材空气耦合超声检测系统。为采用宽脉冲激励提高发射端平均功率,该系统由信号发生电路产生编码脉冲激励信号,通过功率放大器进行放大后激励超声发射换能器。待测木材放在发射和接收换能器中间,超声波垂直穿过木材后到达接收换能器。前置放大器对接收换能器产生的微弱电信号进行信号调理后,经数据采集传输至上位机。上位机通过匹配滤波器对接收信号进行脉冲压缩,获得小时宽、高信噪比的脉冲信号。同时,上位机负责向电机控制器发送目标扫描位置指令,控制超声换能器的移动位置,依次对待测木材的采样点进行采样。扫描完毕后,上位机根据脉冲压缩结果分析超声波传播过程中特征参数的变化并进行实时成像,实现对木材缺陷的可视化定位。

1.2 脉冲压缩技术原理

调频脉冲压缩技术和相位编码脉冲压缩技术是两种常用的脉冲压缩处理技术^[15-17]。相比于调频脉冲压缩技术,相位编码脉冲压缩技术具有容易实现、脉冲压缩后的信号信噪比更优的特点^[18]。因此,在木材空气耦合超声检测领域中更适合使用相位编码脉冲压缩技术。

相位编码中常用的编码方式为二相编码,通常用载波信号相位的 0° 和 180° 分别表示基带信号的 1 和 0。巴

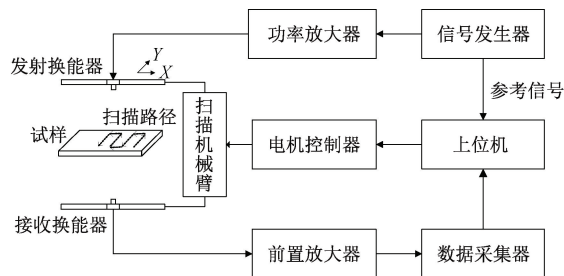


图 1 脉冲压缩的空气耦合超声检测系统

Fig. 1 Pulse compression air-coupled ultrasonic detection system

克码、Golay 码、M 序列是较为常用的几种二相编码序列。其中,巴克码只需单次发射,且具有较好的检测分辨率和噪声抑制能力,相比其他调制方式更容易产生。巴克码是一个二进制码组,取值只能是 +1 和 -1,不能直接作为超声换能器的激励信号,需要进行高频载波调制后才能作为换能器的激励信号。以典型的 7 位巴克码序列 $a_k = \{1110010\}$,载波信号为正弦信号为例,在时域上将载波信号与巴克码信号相乘后作为激励信号。其调制过程原理如图 2 所示,调制结果如图 3 所示。

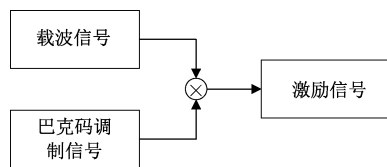


图 2 巴克码激励信号调制过程

Fig. 2 The process of Barker code excitation signal modulation

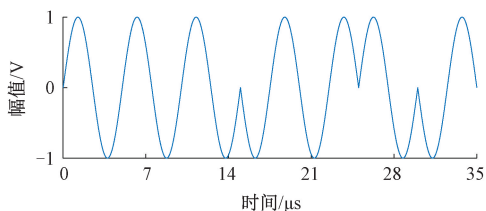


图 3 7 位巴克码调制结果

Fig. 3 The results of 7-bit Barker coded sequence modulation

发射端采用相位编码激励时,接收端采用匹配滤波器对回波信号进行脉冲压缩的过程,即为求回波信号与发射端激励参考信号的互相关的过程。设激励端参考信号为 $h(t)$,接收端响应信号为 $s(t)$,则这两个信号的互相关函数表达式 $R(t)$ 如式(1)所示:

$$R(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau - t)s(\tau) d\tau \quad (1)$$

将其互相关的定义式进行变形,如式(2)所示:

$$R(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau - t)s(\tau) d\tau = h(-t) * s(t) \quad (2)$$

根据式(2)可以看出求两个信号的互相关的过程可通过时域中将参考信号 $h(t)$ 反折为 $h(-t)$ 后与响应信号

$s(t)$ 进行卷积来实现。为实现在频域中计算,提高数据处理速度,对式(2)进一步变换得:

$$R(t) = h(-t) * s(t) = \text{IFFT}(H(-j\omega)S(j\omega)) = \text{IFFT}(H^*(j\omega)S(j\omega)) \quad (3)$$

式中: $H(j\omega)$ 为 $h(t)$ 的 FFT 傅里叶变换, $S(j\omega)$ 为 $s(t)$ 的 FFT 傅里叶变换, $H^*(j\omega)$ 为 $H(j\omega)$ 的共轭, IFFT 为傅里叶逆变换。

根据式(3),接收换能器的脉冲压缩信号通过求参考信号 $h(t)$ 的 FFT,并对其取共轭后与响应信号 $s(t)$ 的 FFT 进行相乘,对乘积结果求 IFFT 得到,该过程可称为互相关匹配滤波器,原理如图 4 所示。

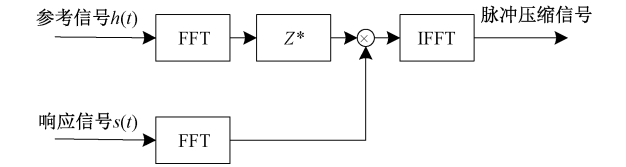


图 4 互相关匹配滤波器原理

Fig. 4 Cross-correlation matched filtering

2 脉冲压缩激励信号的产生

设一个具有 N 位码元的二进制巴克码组为 $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, 自相关函数 $R(j)$ 满足式(4):

$$R(j) = \sum_{k=1}^{N-j} x_k x_{k+j} = \begin{cases} N, & j = 0 \\ 0 \text{ 或 } \pm 1, & 0 < j < N \\ 0, & j \geq N \end{cases} \quad (4)$$

已知的巴克码按码长分共有 7 种,其码长分别为 2、3、4、5、7、11 和 13。由其自相关定义可知,巴克码的自相关的峰值 $R(0) = N$,其他处的绝对值均小于 1。通常选择自相关主瓣旁瓣比值较大的巴克码信号作为激励信号,定义峰值旁瓣水平(PSL)为:

$$PSL = 20\log\left(\frac{\text{旁瓣峰值}}{\text{主瓣峰值}}\right) \quad (5)$$

根据式(5)计算七种巴克码的峰值旁瓣水平,如表 1 所示。

表 1 巴克码序列及峰值旁瓣水平

码长	巴克码序列	PSL/dB
2	+1, -1; +1, +1	-6
3	+1, +1, -1	-9.6
4	+1, +1, -1, +1; +1, +1, +1, -1	-12
5	+1, +1, +1, -1, +1	-14
7	+1, +1, +1, -1, -1, +1, -1	-16.9
11	+1, +1, +1, -1, -1, -1, +1, -1, -1, +1, -1	-20.8
13	+1, +1, +1, +1, +1, -1, -1, +1, +1, -1, +1, -1, +1	-22.3

根据表 1 可知,随着巴克码码元位数的增加,脉冲压缩后的峰值旁瓣抑制能力逐渐增强,这表明 13 位巴克码作为二相编码序列时的对旁瓣的抑制效果最好,主瓣识别更为容易。此外,当载波周期数增加时,接收信号的幅值也增加,但是超过 3 载波周期以上的接收信号幅值基本不变。因此,本文木材空气耦合超声检测采用 13 位巴克码作为发射端超声换能器的激励方式。图 5(a)为正弦载波信号,其频率为超声探头的谐振频率。巴克码信号如图 5(b)所示,将巴克码信号与载波信号在时域上相乘即得到调制后的激励信号如图 5(c)所示。

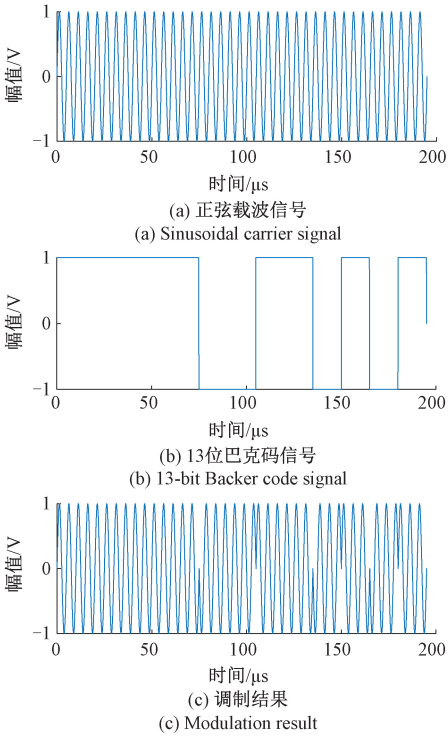


图 5 13 位巴克码调制信号

Fig. 5 Modulation signal of 13-bit Barker code

将图 5 所示的 13 位巴克码激励信号经功率放大器驱动发射换能器产生超声波,接收换能器获得的回波信号如图 6(a) 所示,其两个波峰处分别为透射波、端面反射波,回波信号经式(3)的互相关滤波器后得到脉冲压缩信号如图 6(b)所示,取脉冲压缩后透射波包络幅值衰减 6 dB 处对应的时宽为主瓣宽度。

3 脉冲压缩在木材检测中的试验

3.1 试验对象

为验证脉冲压缩技术在木材空气耦合超声检测中的应用效果,试验设置发射与接收换能器两者的间距为 20 cm,发射换能器的激励电压为 400 V_{pp} ,接收换能器的

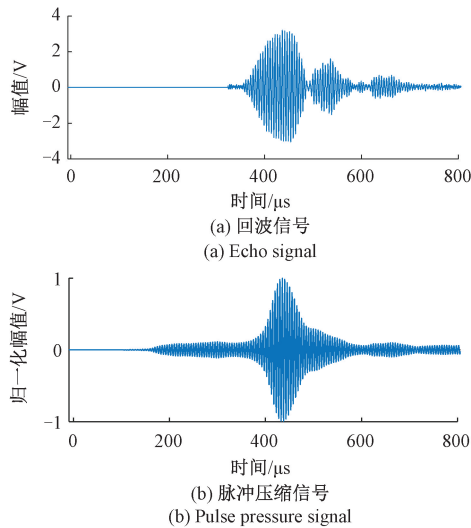


图 6 13 位巴克码的回波信号与脉冲压缩信号
Fig. 6 Echo signal and pulse pressure
signal of 13-bit Barker code

放大增益为 72 dB,按图 1 所示,在两个换能器之间放置 10 mm 厚的松木板作为试样,木材上有直径 19 mm 圆形节子缺陷且缺陷中心有 1 mm 宽裂纹,如图 7 所示。由上位机驱动 XY 轴电机,控制空气耦合超声的扫描路径。



图 7 带有节子和裂纹缺陷的木材试样
Fig. 7 Wood sample with crack and knot defects

3.2 木材无缺陷与有缺陷处的检测对比

为比较在正弦信号和巴克码信号两个不同激励下的差异,分别对木材节子处(有缺陷)和无节子处(无缺陷)进行单点扫描。
图 8(a)和(b)分别为木板在正弦信号激励下,木材无节子处(无缺陷)和节子处(有缺陷)的接收信号,图中信号幅值做归一化处理。可知,在相同激励条件下,无缺陷处的回波信号明显,但是在有缺陷处其回波信号很小,信噪比小,较难检测幅值,这是由于超声波经过木材上下

表面两次大幅度衰减所致。
图 8(c)和(d)分别为木板在巴克码信号激励下,木材无节子处(无缺陷)和节子处(有缺陷)的接收信号,图中信号幅值做归一化处理。可知,回波信号经过互相关匹配滤波器后的脉冲压缩信号,有缺陷的信号主瓣幅值明显,容易检测。

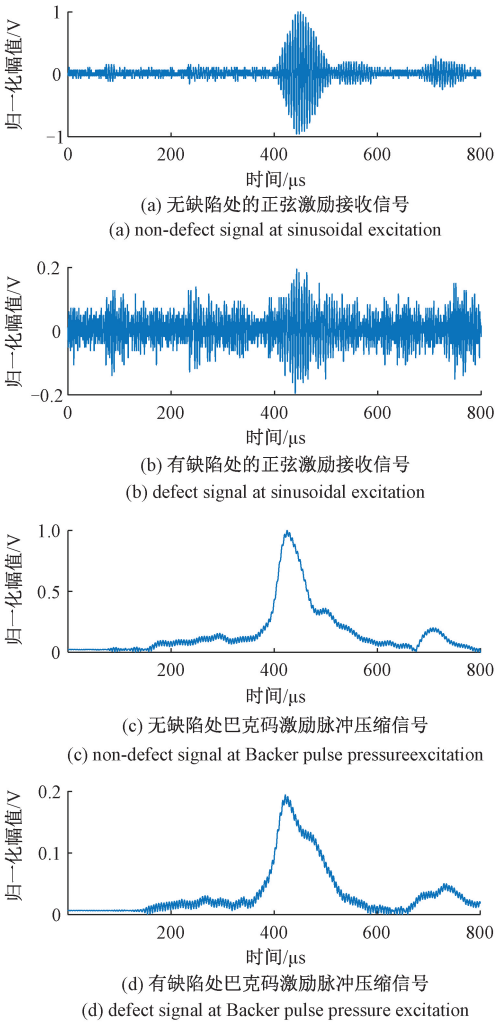


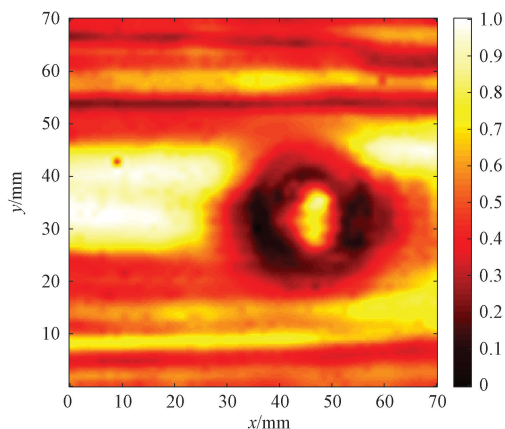
图 8 检测信号处理结果对比
Fig. 8 Comparison results of signal processing

图 8 结果表明,采用正弦信号激励下,无缺陷处接收信号的信噪比为 13.97 dB,有缺陷处接收信号的信噪比为 7.36 dB;采用巴克码信号激励下,无缺陷处脉冲压缩信号的信噪比为 18.41 dB,有缺陷处脉冲压缩信号的信噪比为 16.48 dB,脉冲压缩后的信噪比提升了 9.12 dB。可知,正弦激励检测缺陷存在峰值难以分辨的问题,而脉冲压缩信号检测效果优于正弦激励检测,缺陷的信噪比明显提高。

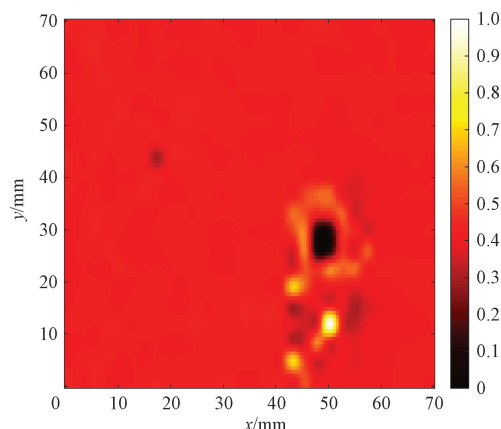
3.3 脉冲压缩的木材 C 扫描检测

分别使用 13 位巴克码信号和正弦信号作为发射端

换能器的激励信号,采用空气耦合超声检测系统对图7所示的含裂纹节子缺陷的试样进行平面C扫描,将每个测试点的数据结果提取特征值进行成像,两种不同激励信号下试样平面扫描成像结果如图9所示。



(a) 巴克码信号激励成像结果
(a) Imaging results of Barker code signal excitation



(b) 正弦信号激励成像结果
(b) Imaging results of sinusoidal signal

图9 两种不同激励信号下C扫描成像结果

Fig.9 C-scan imaging results of samples with two different excitation signals

由图9的结果可知,脉冲压缩的木材C扫描成像能清晰实现节子和裂纹两种缺陷的精确检测和定位。测量节子缺陷成像直径21 mm,节子实际尺寸约19 mm,检测相对误差精度90%以上。而正弦信号激励的扫描成像只能定性对缺陷检测,精度和准确度不及巴克码激励检测。

4 结 论

本文通过巴克码编码的脉冲压缩技术产生超声波激励,采用空气耦合方式对缺陷木材进行平面扫描成像检测。首先介绍了木材空气耦合超声平面检测系统构成,再对脉冲压缩激励信号的调制产生和接收信号的解调滤波进行了数学分析,以单点测试的试验对比了在正弦信

号和巴克码信号两个不同激励条件下,木材有缺陷和无缺陷的结果差异。最后,分别验证了在两种不同激励信号下,木板的平面扫描检测与成像结果。实验结果表明,采用巴克码编码激励能够有效地提高检测信号的信噪比,相比于正弦波激励,更易提取信号的特征值,提高超声波透射信号的识别能力。该方法能有效地识别木材有缺陷和无缺陷材质特性的差异,可视化缺陷的位置,为提高板材质量评价与分等提供依据。

参考文献

- [1] YANG Y T, ZHOU X L, LIU Y, et al. Wood defect detection based on depth extreme learning machine[J]. Applied Sciences, 2020, 10(21): 7488-7488.
- [2] 赵心悦, 张一凡, 王正, 等. 四种木结构建筑楼盖结构的撞击声隔声性能研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(2): 70-76.
- [3] 朱昊, 黄侯劼, 王正, 等. 木结构建筑楼盖结构振动性能的研究进展[J]. 林业机械与木工设备, 2021, 49(6): 5-9.
- [4] MORI M, HASEGAWA M, YOO J C, et al. Nondestructive evaluation of bending strength of wood with artificial holes by employing air-coupled ultrasonic [J]. Construction and Building Materials, 2016, 110: 24-31.
- [5] VSSING K J, GAAL M, NIEDERLEITHINGER E. Imaging wood defects using air coupled ferroelectret ultrasonic transducers in reflection mode [J]. Construction and Building Materials, 2020, 241: 1-9.
- [6] WANG X G, WU W L, HUANG Z C, et al. Research on the transmission characteristics of air-coupled ultrasound in double-layered bonded structures [J]. Materials (Basel, Switzerland), 2018, 11(2): 310-342.
- [7] BOCCACCIO M, RACHIGLIA P, FIERRO G P M, et al. Deep subwavelength optimized holey structured metamaterial lens for nonlinear air-coupled ultrasonic imaging[J]. Sensors, 2021, 21(4): 1170-1185.
- [8] 周正干, 魏东, 向上. 空气耦合超声检测中衰减因素的研究[J]. 中国机械工程, 2010(19): 2350-2354.
- [9] ZHOU ZH G, WEI D, XIANG SH. Research on attenuation factor of air-coupled ultrasonic testing [J]. China Mechanical Engineering, 2010(19): 2350-2354.

- [9] 胡宸, 邬冠华, 罗文斌, 等. 噪声环境下空耦超声 Lamb 波铝板扫查成像定量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(5): 120-127.
HU CH, WU G H, LUO W B, et al. Study on damage imaging of aluminum plate by air-coupled ultrasonic lamb wave [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(5): 120-127.
- [10] 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.
- [11] KHER V, MULAVEESALA R. Probability of defect detection in pulse compression favourable frequency modulated thermal wave imaging [J]. Electronics Letters, 2019, 55(14): 789-791.
- [12] WEI N, ZHANG L K. Design of phase codes with interval staggering for Doppler ambiguous target detection [J]. Electronics Letters, 2013, 49(24): 1564-1565.
- [13] 周正干, 马保全, 孙志明, 等. 空气耦合超声检测中脉冲压缩方法的参数选优[J]. 北京航空航天大学学报, 2015(1): 1-7.
ZHOU ZH G, MA B Q, SUN ZH M, et al. Parameter optimization of pulse compression method in air-coupled ultrasonic testing [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(1): 1-7.
- [14] 石文泽, 程进杰, 胡硕臻, 等. 脉冲压缩在铝薄板电磁超声导波检测中的应用[J]. 航空学报, 2021, 42(11): 425063; 1-13.
SHI W Z, CHENG J J, HU SH ZH, et al. Application of pulse compression in electromagnetic ultrasonic guided wave detection of aluminum sheet [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(11): 425063; 1-13.
- [15] GHALI V S, PANDA S S B, MULAVEESALA R. Barker coded thermal wave imaging for defect detection in carbon fibre-reinforced plastics [J]. Insight Non Destructive Testing and Condition Monitoring, 2011, 53(11): 621-624.
- [16] DUA G, MULAVEESALA R. Applications of Barker coded infrared imaging method for characterisation of glass fibre reinforced plastic materials [J]. Electronics Letters, 2013, 49(17): 1071-1072.
- [17] 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.
- [18] 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(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.

作者简介



王军(通信作者), 2005 年和 2010 年于南京航空航天大学分别获得硕士学位和博士学位, 现为南京林业大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为超声传感器设计、空气耦合超声检测。

E-mail: ww3422@126.com

Wang Jun (Corresponding author) received the M. Sc. and Ph. D. degrees from the Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, in 2005 and 2010 respectively. Now he is an associate professor with Nanjing Forestry University. His main research interests include the design of ultrasonic transducers and air-coupled ultrasonic testing.



李强鑫, 2021 年于南京林业大学获得学士学位, 现为东北大学硕士研究生, 主要研究方向为超声无损检测。

E-mail: 875715647@qq.com

Li Qiangxin received his B. Sc. degree from Nanjing Forestry University in 2021. Now he is a M. Sc. candidate in Northeastern University. His main research interest includes ultrasonic nondestructive testing.