

◇ 研究报告 ◇

超声换能器对线性调频信号脉冲压缩性能的影响分析*

王强^{1,2} 毛捷^{1,2†} 廉国选¹

(1 中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 该文研究了不同编码带宽下超声换能器对编码信号脉冲压缩后信噪比与轴向分辨率的影响关系。将脉冲压缩后的时域峰值转化为频域积分的形式,得到考虑换能器影响的脉冲压缩信噪比公式。以线性调频信号为例,仿真与实验结果表明,编码激励相对于方波激励的信噪比增益随编码带宽的减小而增大,因为受换能器带宽限制,编码激励的轴向分辨率随编码带宽的增大先减小后趋于稳定。该研究为编码激励方法更有效地应用于超声检测的背景中提供了参考。

关键词: 脉冲压缩; 信噪比; 轴向分辨率

中图法分类号: TB553

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2020)04-0558-05

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.04.009

Analysis of the influence of ultrasonic transducer on pulse compression performance of chirp signal

WANG Qiang^{1,2} MAO Jie^{1,2} LIAN Guoxuan¹

(1 State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, the effects of ultrasonic transducer on the signal-to-noise ratio and axial resolution of coded signals after compression are studied under different coding bandwidths. The pulse-compressed time domain peak is converted into the form of frequency domain integral, and the pulse compression signal-to-noise ratio formula considering the influence of the transducer is obtained. Taking the chirp signal as an example, the simulation and experimental results show that the signal-to-noise ratio gain of the coded excitation relative to the square wave excitation increases with the decrease of the coding bandwidth. Because of the limitation of transducer bandwidth, the axial resolution of coded excitation method decreases first and then stabilizes with the increase of coding bandwidth. The research in this paper provides a reference for the application of coded excitation method in the background of ultrasonic detection.

Keywords: Pulse compression; Signal-to-noise ratio; Axial resolution

2019-08-27 收稿; 2019-11-28 定稿

*中科院创新基金项目 (CXJJ-16Z220)

作者简介: 王强 (1991-), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 研究方向: 信号与信息处理。

†通信作者 E-mail: maojie@mail.ioa.ac.cn

0 引言

20世纪70年代,基于编码激励的脉冲压缩技术开始应用于超声检测,编码信号从调制方式上主要分为频率调制和二进制相位调制,其中以频率调制的线性调频信号最为常见^[1-9]。国内外学者针对线性调频信号应用于超声系统的特点进行了许多研究。周正干等^[1]将线性调频信号应用在空气耦合超声检测中,通过实验得出结论:主瓣峰值随编码信号带宽增加而下降,主瓣宽度随编码信号带宽增加呈先减小后稳定的趋势。Behar等^[2]仿真分析了换能器带宽与线性调频信号带宽相对值对脉冲压缩的影响,仿真得出结论:相对值(范围为1~15)为1时,脉冲压缩可以达到最高的信噪比增益与最好的轴向分辨率。丛森^[3]重新定义了考虑旁瓣能量的信噪比公式,通过实验得出结论:脉冲压缩信噪比随线性调频信号带宽增加呈先增大后减小的趋势。

前人文献中多采用雷达领域中的经典表达式作为理论指导,信噪比增益为编码信号脉冲压缩前后信噪比的比值,未考虑超声换能器的影响^[4];在实验中,编码信号脉冲压缩后的信噪比常常仅使用主瓣高度来表征^[5],忽略了噪声的影响。为了将编码激励方法更有效地应用于超声检测的背景中,本文研究了换能器影响下的线性调频信号脉冲压缩后信噪比的解析表达式,并与传统的方波激励进行比较得到信噪比增益变化规律。因为实际超声检测中,旁瓣水平受噪声、换能器响应拖尾等因素影响^[6],难以定量分析作为一般规律,所以本文重点研究换能器对线性调频信号脉冲压缩后信噪比与轴向分辨率随编码信号带宽变化的规律。

1 理论分析

传统超声成像中常使用方波作为激励信号,为了与编码激励进行比较,定义信噪比增益公式为

$$\text{GSNR} = \frac{\text{SNR}_2}{\text{SNR}_1}, \quad (1)$$

其中, SNR_1 表示方波激励后回波经过滤波的信噪比,滤波器通带范围的选择应尽可能覆盖换能器脉冲响应的频率分量, SNR_2 表示编码激励后回波经过脉冲压缩的信噪比。假设换能器响应可以近似为

高斯信号,则其频域表达式为

$$S_t(f) = e^{-\alpha \left(\frac{f-f_t}{B_t} \right)^2}, \quad (2)$$

其中, f_t 为换能器的中心频率, B_t 为换能器的-6 dB带宽, α 是一个常量 $4 \ln 2$ 。

当编码信号为线性调频信号时,其实信号的表达式为

$$s_c(t) = \sin \left[2\pi \left(\left(f_c - \frac{B_c}{2} \right) t + \frac{B_c}{2T} t^2 \right) \right], \quad (3)$$

$$0 \leq t \leq T,$$

其中, f_c 、 B_c 与 T 分别为编码信号的中心频率、带宽与时长。线性调频信号经过匹配滤波器进行脉冲压缩,匹配滤波器的响应形式与公式(3)相同,忽略换能器响应的加权作用,假设脉冲压缩后的结果取包络成像且信号的主要能量集中于编码信号带宽 B_c 内,则有

$$\text{SNR}_2 \approx \frac{T}{2N_0}, \quad (4)$$

其中, N_0 为噪声功率谱密度,此时编码信号的带宽并不影响脉冲压缩的信噪比结果。当考虑换能器响应加权作用时,

$$\text{SNR}_2 \approx \frac{T}{2B_c^2 N_0} \left(\int_{f_c - B_c/2}^{f_c + B_c/2} |S_t(f)| df \right)^2, \quad (5)$$

由公式(5)可知,当编码信号时长固定且中心频率等于换能器中心频率时,基于换能器高斯响应的加权作用,编码信号的带宽越小则公式(5)中的积分值越接近于 B_c ,此时可以获得更高的信噪比。

2 实验及讨论

2.1 实验装置与条件

实验装置如图1所示。检测样本为聚苯乙烯试块,厚度为7 cm,纵波声速为2188 m/s。发射接收换能器时频响应如图2所示,其中心频率为800 kHz,-6 dB带宽为500 kHz。取线性调频信号时长40 μs ,中心频率等于换能器中心频率,编码带宽从0.1 MHz到1.6 MHz,步长为0.1 MHz。对于方波激励方法,脉冲宽度为换能器中心频率倒数的二分之一,并设计通带宽度1.6 MHz的低通滤波器。

首先使用电脑中任意波形编辑软件(Tektronix)生成激励信号,然后载入任意信号发生器(AFG3102)并经过功率放大器(75A250A)放大后

激励发射换能器产生超声波, 超声波经过聚苯乙烯试块后由接收换能器接收, 接收信号由接收器 (Panametrics5800) 放大、示波器 (DPO4032) 采集后传输到电脑做进一步信号处理。实验中设置方波激励与编码激励具有同样峰峰值的激励电压, 所有实验数据均重复测量8次, 为了防止脉冲压缩后旁瓣的干扰, 噪声功率选择在足够远的区间内计算。

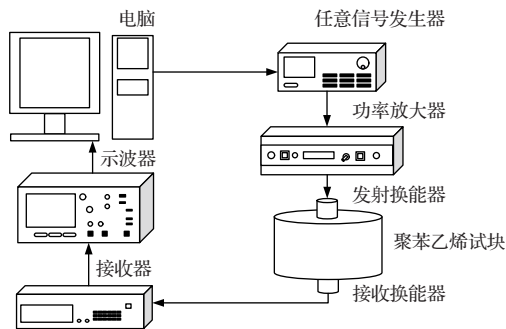


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

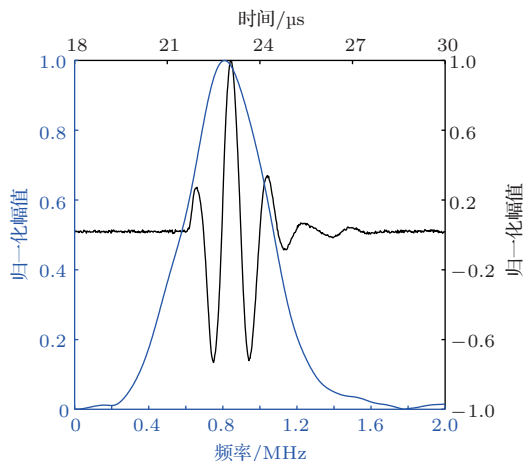


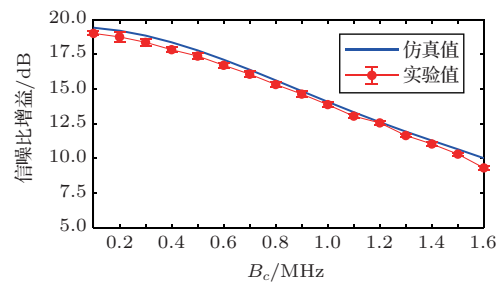
图2 发射接收换能器时频响应

Fig. 2 Impulse response of the TR transducer in time and frequency domain

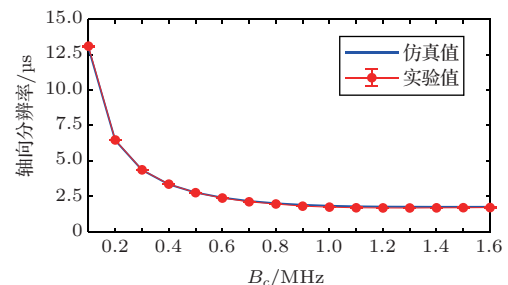
2.2 实验结果与讨论

信噪比增益与轴向分辨率的实验值与仿真值如图3所示, 其中轴向分辨率定义为包络信号的 -6 dB主瓣宽度, 实验值以均值、标准差的形式给出误差棒图, 可以看到实验值与仿真值吻合很好。当编码带宽等于 0.1 MHz时, 信噪比增益达到最高值 19.0 dB, 轴向分辨率达到最大值 13.1 μ s; 当编码带宽等于 1.6 MHz时, 信噪比增益达到最低值 9.3 dB; 当编码带宽从 1.1 MHz变化至 1.6 MHz时, 轴向分

辨率趋于 1.7 μ s。图4(a)、图5(a)与图6(a)给出带宽为 0.1 MHz、 1.1 MHz与 1.6 MHz时的线性调频回波信号, 可以看到其峰峰值几乎一样, 原因在于换能器可看作具有高斯响应的滤波器, 滤波器的幅频响应的最高值对应 800 kHz, 因为线性调频信号的中间时刻对应的瞬时频率为 800 kHz, 所以经过换能器响应的线性调频信号的峰值将出现在信号的中间时刻。带宽为 0.1 MHz时, 线性调频的时域波形失真最小, 此时脉冲压缩后的信噪比最高; 带宽从 1.1 MHz变化到 1.6 MHz时, 编码信号波形失真变大, 脉冲压缩后的信噪比降低。图4(b)、图5(b)与图6(b)给出相应带宽的脉冲压缩后时域包络图, 它们具有相近的噪声水平, 峰值高度随编码带宽增大而减小。



(a) 信噪比增益



(b) 轴向分辨率

图3 脉冲压缩性能指标

Fig. 3 Performance indicators of pulse compression

信噪比增益随线性调频信号带宽增大而减小, 轴向分辨率随编码带宽的增大先减小后趋于稳定, 信噪比增益与轴向分辨率为一对矛盾的关系。公式(5)准确地反映了信噪比增益的变化规律, 因为换能器响应的高斯假设, 编码信号的带宽越大, 造成的失配效果越大, 所以信噪比增益下降。同时, 因为换能器的带宽限制, 轴向分辨率存在极限值。实际检测中, 如果介质的深度方向存在多个散射体, 较小的编码带宽虽然能提供较高的信噪比增益, 但是较宽的主瓣会降低轴向分辨率。

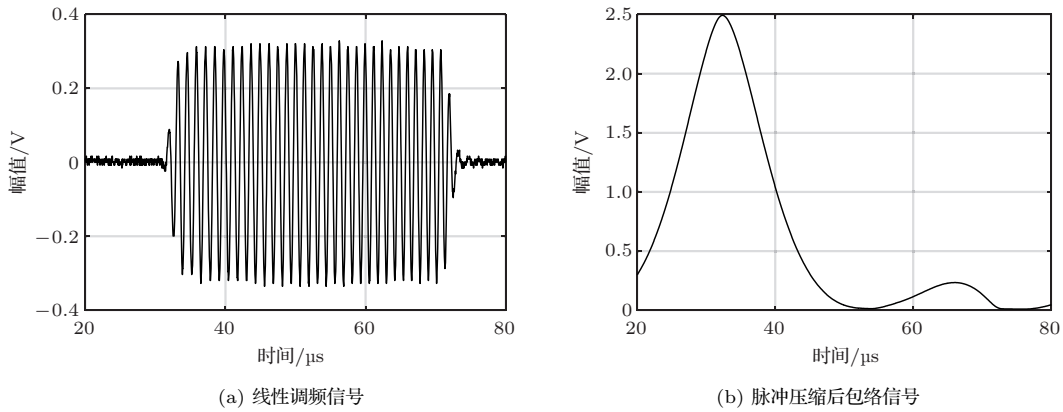


图4 激励信号带宽0.1 MHz

Fig. 4 Excitation signal with bandwidth of 0.1 MHz

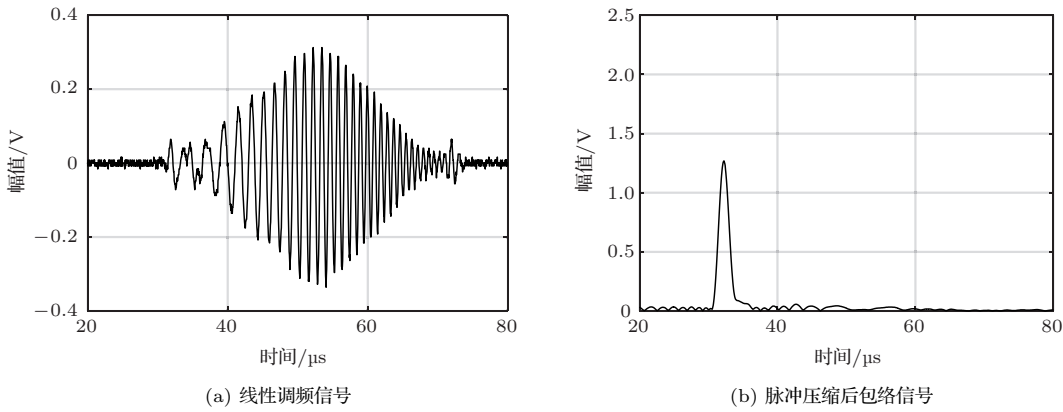


图5 激励信号带宽1.1 MHz

Fig. 5 Excitation signal with bandwidth of 1.1 MHz

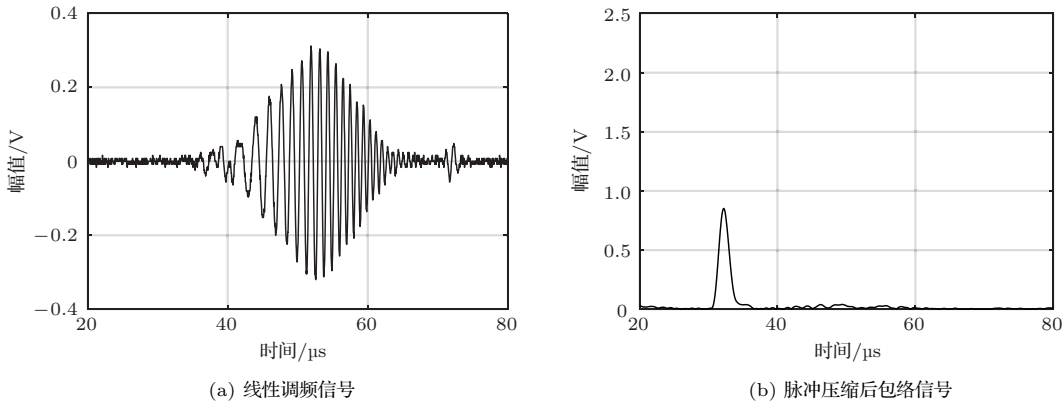


图6 激励信号带宽1.6 MHz

Fig. 6 Excitation signal with bandwidth of 1.6 MHz

3 结论

在超声检测背景下，以线性调频信号为例，基于换能器响应的高斯假设，从频域角度分析，将脉冲

压缩的峰值功率表示为频域积分的形式，给出考虑换能器响应的编码激励脉冲压缩后的信噪比表达式，指出当编码带宽较小时，换能器响应对编码信号的加权损失较小，使得编码激励相对于方波激励可

以获得更高的信噪比,当编码带宽增大时,换能器带宽的限制使得编码激励方法的轴向分辨率先减小后趋于稳定。

参 考 文 献

- [1] 周正干, 魏东, 向上. 线性调频脉冲压缩方法在空气耦合超声检测中的应用研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 24–28, 35.
Zhou Zhenggan, Wei Dong, Xiang Shang. Application of linear-frequency-modulation based pulse compression in air-coupled ultrasonic testing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 24–28, 35.
- [2] Behar V, Adam D. Parameter optimization of pulse compression in ultrasound imaging systems with coded excitation[J]. Ultrasonics, 2004, 42(10): 1101–1109.
- [3] 丛森. 超声调频激励方法及奥氏体不锈钢焊缝缺陷检测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 1–120.
- [4] Misaridis T, Jensen J A. Use of modulated excitation signals in medical ultrasound. Part I: basic concepts and expected benefits[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(2): 177–191.
- [5] 李长征, 邱长春, 黄建通, 等. 编码检测技术中换能器带宽影响分析[J]. 人民黄河, 2012, 34(10): 136–138.
Li Changzheng, Qiu Changchun, Huang Jiantong, et al. Analysis on influence from bandwidth of transducer in encoding detection technology[J]. Yellow River, 2012, 34(10): 136–138.
- [6] Wang Q, Mao J, Lian G. Ultrasonic chirp-coded excitation for highly attenuating material testing[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2019, 58(8): 086504.
- [7] Cong S, Gang T, Zhang J. Parameter design of linear frequency modulated excitation waveform for ultrasonic nondestructive testing of metallic materials[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2014, 33(4): 684–693.
- [8] 崔付俊, 刘世博, 何立功, 等. 线性调频信号激励超声换能器的方法研究[J]. 声学技术, 2014, 33(5): 439–445.
Cui Fujun, Liu Shibo, He Ligong, et al. The research of ultrasonic transducer excited by chirp signal[J]. Technical Acoustics, 2014, 33(5): 439–445.
- [9] Misaridis T, Jensen J A. Use of modulated excitation signals in medical ultrasound. Part I: design and performance for medical imaging applications[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(2): 192–207.