

线性调频信号激励超声换能器的方法研究

崔付俊, 刘世博, 何立功, 曹霞, 郭建中

(陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西西安 710062)

摘要: 针对超声换能器的特性, 研究等幅及包络调制线性调频波的换能器激励响应。通过对比激励前后脉冲压缩的主瓣峰值、 -3dB 主瓣带宽和峰值旁瓣水平, 探讨通过换能器后其信噪比和分辨率的性能。理论分析和仿真实验结果表明, 两种调频信号通过换能器后信噪比和分辨率都减少, 峰值旁瓣有所提高。包络调制线性调频信号激励换能器脉冲压缩的信噪比和分辨率高于等幅线性调频信号, 但能量损失比等幅线性调频信号大。

关键词: 线性调频信号; 超声换能器; 脉冲压缩; 信噪比; 分辨率

中图分类号: TB56

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-05-0439-07

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.05.011

The research of ultrasonic transducer excited by chirp signal

CUI Fu-jun, LIU Shi-bo, HE Li-gong, CAO Xia, GUO Jian-zhong

(Shaanxi Normal University, School of Physics and Information Technology, Xi'an 710062, Shaanxi, China)

Abstract: In this paper, the dynamic responses of the transducer to the equal amplitude chirp and envelope modulated chirp pulse excitation are studied. By comparing the main lobe peak values, -3dB bandwidths of the main lobes and the peak side-lobe-levels under the two pulse excitation signals, the performances of SNRs and resolutions corresponding to the two signals are analyzed. The results of theoretical analysis and simulation experiment show that the SNRs and resolutions of the two signals after transducer decreased, but peak side-lobe-levels improved. Compared with the equal amplitude chirp pulse excitation, the SNR and resolution of envelope modulated chirp pulse excitation after transducer is greater, while the corresponding energy loss is higher.

Key words: chirp signal; ultrasonic transducer; pulse compression; SNR; resolution

0 引言

在超声医学中, 生物组织对超声效应的受限程度使得超声脉冲幅度不能太高。在传统超声诊断中, 尽可能采用窄脉冲激励宽带超声换能器来提高系统分辨率。为了提高信噪比和检测深度, 现有的实验都在最大限度地提高发射峰值声功率。虽然峰值幅度达到了最大允许值, 但平均声功率还是很低。Matthew O'Donnell 等人发现^[1], 超声检测峰值声功率已经很接近安全标准上限, 可是平均声功率却还不到安全标准的 1%。

编码激励和脉冲压缩有效地解决了雷达系统中作用距离以及距离分辨力之间的矛盾, 提高了平均发射功率^[2]。1974 年, Newhouse 首次将编码激励引入到医学超声成像, 并在此后的时间里做了大量

的研究。文献[3]表明, 使用二维解析小波阈值对超声脉冲反射波信号进行滤噪, 性能可以提高。傅娟等^[4]提出相对幅度相等的包络线性调频编码方法和预失真线性调频编码方法, 不仅提高了轴向分辨力, 而且使最大旁瓣幅度减小至 -48 dB 以下。刘波^[5]通过仿真和实验对 1~5 周期载频的 13 位巴克码载频调制信号激励换能器, 得到单位码元载有 3 个周期载频的激励信号, 通过换能器后, 脉冲压缩效果最佳。在超声血流检测与成像系统中, 线性调频信号能够在不损失精度的前提下提高回波信号的信噪比, 提高血流成像质量^[6]。Jennifer 等^[7]提出短促声波激发的超声导波可以减少采集时间, 提高信噪比。魏东等^[8]指出, 改进的非线性调频脉冲压缩方法可以有效提高脉冲压缩效果, 并且有利于改善空气耦合超声检测的效果。

依据编码调制及脉冲压缩方法原理^[9], 信号的距离分辨率取决于信号带宽, 单载频脉冲信号的时宽 T 和带宽 B 满足 $TB=1$, 宽脉冲必然降低距离分辨率, 系统的穿透力和分辨率存在矛盾^[10]。在不增加峰值功率的前提下, 编码信号的 TB 积变大, 增强了信号能量, 提高了平均发射功率。对长脉冲回

收稿日期: 2013-07-30; 修稿日期: 2013-09-31

基金项目: 国家自然科学基金(10974128、11274217), 陕西师范大学中央高校基本科研业务费专项资金(Gk20131009)资助项目。

作者简介: 崔付俊(1988—), 男, 山西大同人, 硕士研究生, 研究方向为超声医学。

通讯作者: 郭建中, E-mail: guojz@snnu.edu.cn

波信号进行脉冲压缩处理后，信号幅值大大增强，信噪比显著提高。

本文考虑换能器频带特性，用适当频带的线性调频波激励信号，研究换能器对激励信号及其脉冲压缩结果的影响。为了提高激励换能器脉冲压缩后的信噪比和分辨率，选用包络调制线性调频波激励换能器。通过仿真和实验对比等幅及包络调制两种不同线性调频波激励换能器后的脉冲压缩结果。

1 原理

1.1 线性调频信号

线性调频信号是脉冲压缩最常见的调制信号，其数学表达式为

$$s(t) = e^{j2\pi(f_c t + \frac{k}{2}t^2)} \quad (1)$$

式中： f_c 为载波频率； $k = \frac{B}{T}$ 是调频斜率；信号瞬时频率为 $f_c + kt$ 。

1.2 脉冲压缩

脉冲压缩的原理是在发射端发送经过调制的大时宽、大带宽信号，在接收端通过相应的匹配处理后，获得与信号带宽的倒数相对应的窄脉冲信号，从而解决增强发射功率和提高距离分辨率之间的矛盾。

假设匹配滤波器的信号定义为 $s(t)$ ，其频谱函数是 $S(w)$ ，匹配滤波器的频域传输函数为输入信号频谱的共轭

$$H(w) = S^*(w) e^{-j\omega t_0} \quad (2)$$

其时域的冲激响应函数为

$$h(t) = s(t_0 - t) \quad (3)$$

它是输入信号 $s(t)$ 的镜像 $s(-t)$ 在时间上平移 t_0 的结果。要使匹配滤波器物理可实现，平移时间必须大于等于信号的终止时间， $s(t)$ 必须在匹配滤波器输出最大信噪比的时刻 t_0 前消失 ($s(t)=0$)，因此其最大信噪比输出时刻 t_0 必须在输入信号全部结束后，物理意义是：若输入信号没有结束，就不能得到信号的全部输入能量和最大信噪比，一般希望 t_0 尽量小些，把 t_0 取在输入信号持续时间末尾。匹配滤波输出信号是输入信号的自相关函数，输出最大信噪比只与输入信号能量有关。

1.3 超声检测系统传输模型

电激励信号 $e(t)$ 激励换能器向被检样品发射超声波，在传播中遇到缺陷或界面产生反射回波，被换能器接收，转换成电信号 $x(t)$ ：

$$x(t) = e(t) * f(t) * h(t) + n(t) \quad (4)$$

其中：样品反射的传输特性为 $f(t)$ ；设 $h_1(t)$ 和 $h_2(t)$ 分别为发射和接收换能器的冲激响应函数，为简化分析模型，收、发换能器的响应等效为 $h(t)$ ； $n(t)$ 为检测随机加性噪声。把脉冲压缩环节引入检测模型，换能器接收的信号通过激励信号 $e(t)$ 对应的匹配滤波器 $e(t_0 - t)$ ，则脉冲压缩结果为

$$r(t) = (e(t) * f(t) * h(t) + n(t)) * e(t_0 - t) = (e(t) * e(t_0 - t) * f(t)) * h(t) + n(t) * e(t_0 - t) \quad (5)$$

式中：第二项是噪声与匹配函数的互相关，明显被抑制；第一项是激励信号匹配滤波结果的自相关函数与换能器脉冲响应的卷积。时域表现为压缩后的脉宽被展宽，引起分辨率下降，频域表现为激励信号通过等效带通滤波器产生能量衰减，引起脉冲压缩的信噪比增益损失。

超声检测传输模型如图 1 所示，为描述清楚以及我们实验的需要，这里把换能器发射和接收两种响应画成两个换能器表示。

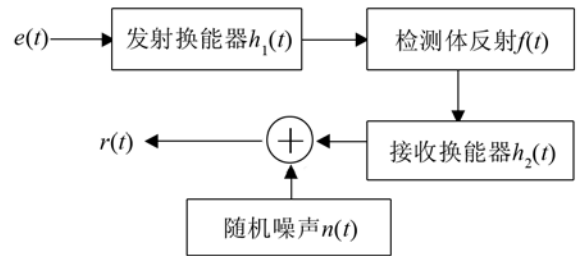


图 1 超声检测传输模型
Fig.1 The model of ultrasonic detection

2 实验研究

2.1 仿真实验研究

换能器冲激响应模型可用高斯包络的正弦信号来描述， $e(t)$ 经 $h(t)$ 传输后的激励声压表达式为

$$p(t) = e^{-\frac{ct}{\sigma}} \sin(\omega_0 t + \theta) \quad (6)$$

其中： t 是传输时间； θ 是初始偏移相位； ω_0 是换能器中心角频率； σ 是与换能器相对带宽 B_A 有关的常数， $\sigma = 3.32 / B_A$ 。

中心频率为 2.25 MHz、带宽为 1.2 MHz 的换能器冲激响应如图 2 所示。换能器的频谱响应相当于一个带通滤波器，结果如图 3 所示。

选用中心频率 2.25 MHz、带宽 1.2 MHz 的线性调频信号 $s(t)$ ，波形如图 4 所示。将线性调频信号 $s(t)$ 通过换能器后，即

$$g(t) = s(t) * p(t) \quad (7)$$

$g(t)$ 波形如图 5 所示，用其包络 $y(t)$ 调制等幅线性调频信号 $s(t)$ ，得 $r(t) = s(t) * y(t)$ 。为了使 $s(t)$ 和

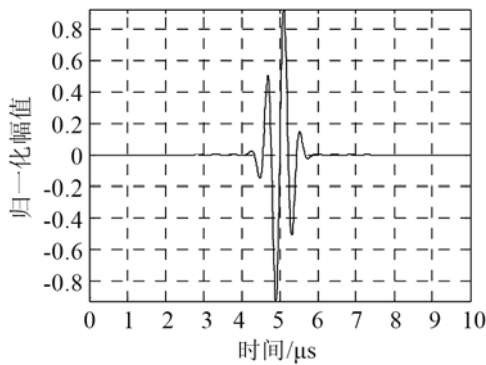


图 2 换能器的单位脉冲响应
Fig.2 The unit impulse response of the transducer

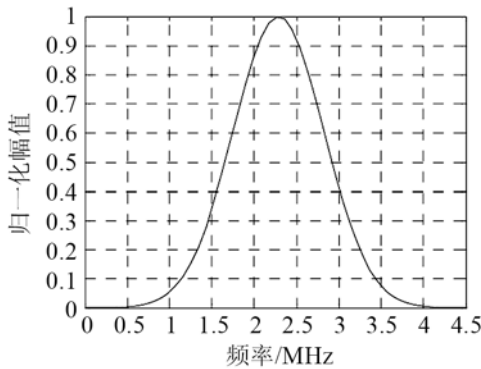


图 3 换能器的单位脉冲响应频谱
Fig.3 The spectrum of the unit impulse response

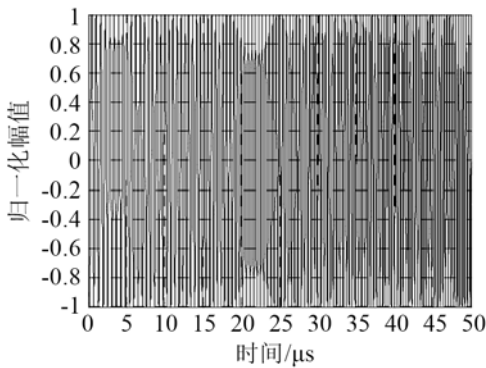


图 4 等幅线性调频信号
Fig.4 The equal amplitude chirp signal

$r(t)$ 激励换能器的能量相等，将 $r(t)$ 的幅值扩大 1.737 倍，结果如图 6 所示。用 $r(t)$ 激励换能器，即 $q(t)=r(t)*p(t)$ ，波形如图 7 所示。

对等幅线性调频波 $s(t)$ 、包络调制线性调频波 $r(t)$ 及其激励换能器后所得波形 $g(t)$ 和 $q(t)$ 进行脉冲压缩，其结果如图 8~11 所示，对比这 4 幅图中脉冲压缩后信号的包络脉宽，其仿真结果如图 12 所示。因研究对象是幅度的趋势，对纵坐标均做了归一化处理。

2.2 实验研究

实验装置采用直径为 1.2 cm、中心频率为 2.25

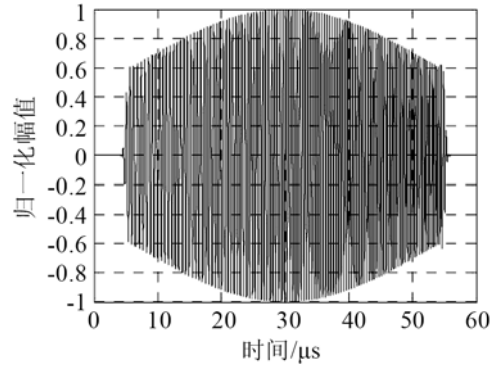


图 5 等幅线性调频信号激励换能器后波形
Fig.5 The equal amplitude chirp signal after transducer

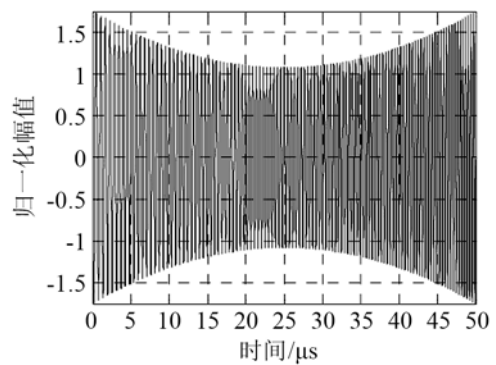


图 6 包络调制的调频信号
Fig.6 The envelope modulated chirp signal

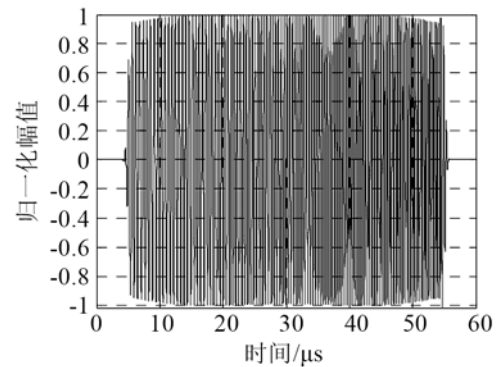


图 7 包络调制的调频信号通过换能器后波形
Fig.7 Envelope modulated chirp signal after transducer

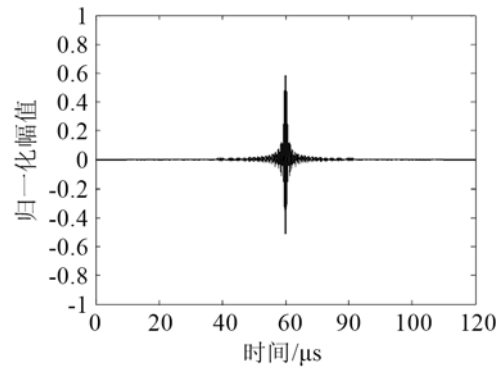


图 8 等幅线性调频信号未激励换能器脉冲压缩结果及包络
Fig.8 The pulse compression output of the signal shown in Fig.4

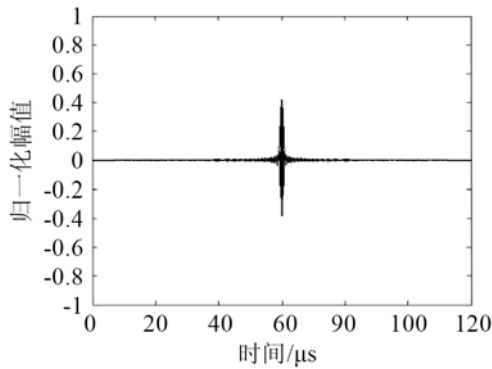


图9 等幅线性调频信号激励换能器脉冲压缩结果及包络
Fig.9 The pulse compression output of the signal shown in Fig.5

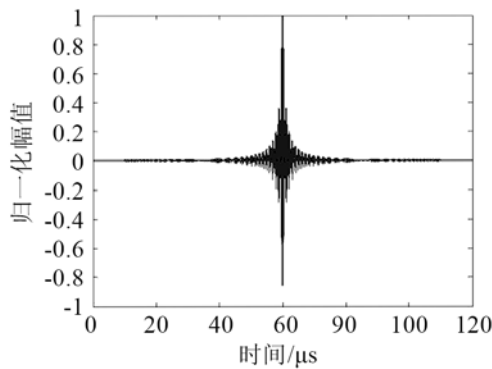


图10 包络调制线性调频信号未激励换能器脉冲压缩结果及包络
Fig.10 The pulse compression output of the signal shown in Fig.6

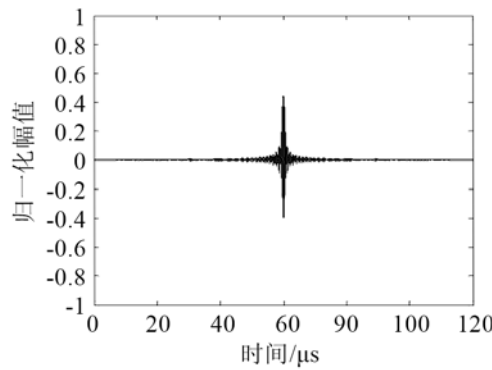


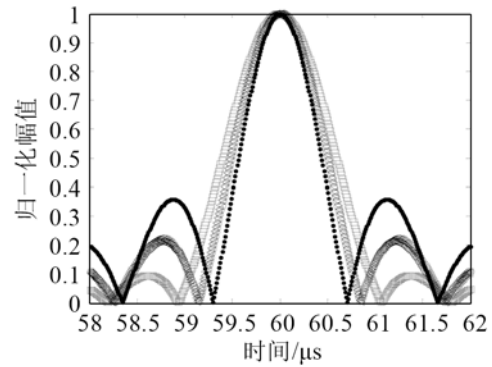
图11 包络调制线性调频信号激励换能器脉冲压缩结果及包络
Fig.11 The pulse compression output of the signal shown in Fig.7

MHz、-3 dB 带宽为 1.2 MHz 的超声换能器发射信号，为了接收较为宽频的信号，用在 2.25 MHz 附近响应比较平坦的中心频率为 10 MHz 的超声换能器接收信号，其直径为 0.8 cm。将换能器平行摆放，在水槽中发射换能器的远场区域放置一根直径为 0.2 mm 的铜靶线用于反射回波信号。通过任意波形发生器(RIGOL DG3000)输出信号，将其作为换能器的激励信号，它的脉冲周期为 100 μs。用前置放大器(PANAMET 5800)将靶线反射回波信号进行放大，然后由数字示波器(TELEDYNE LECROY HDO4000)采集信号，采样频率为 100 MHz，实验

装置如图 13 所示。

激励换能器的波形分别为 $s(t)$ 和 $r(t)$ ，如图 14、16 所示。由数字示波器采样反射波形，如图 15、17 所示。

对图 14~17 所示的波形进行脉冲压缩，其结果如图 18~21 所示。对比脉冲压缩后信号的包络脉宽仿真结果如图 22 所示。



○ 等幅调频信号脉冲压缩结果 ◦ 包络调制调频信号脉冲压缩结果
□ 等幅调频信号激励换能器脉冲压缩结果
△ 包络调制调频信号激励换能器脉冲压缩结果

图12 脉冲压缩包络脉宽对比仿真结果
Fig.12 The envelope waveforms of pulse compression outputs

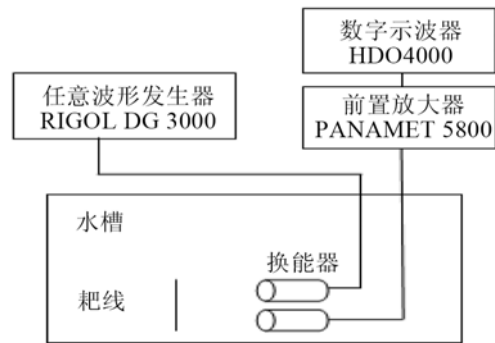


图13 实验装置示意图
Fig.13 Schematic diagram of experimental apparatus

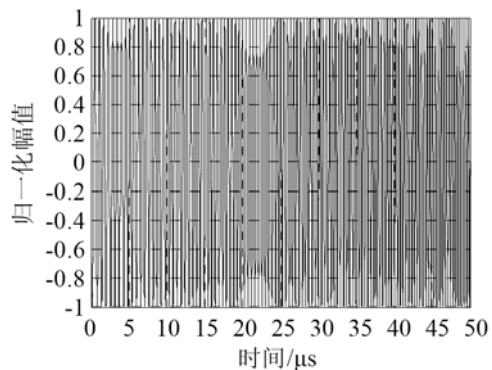


图14 等幅线性调频信号
Fig.14 The equal amplitude chirp signal

2.3 数据分析

从仿真和实验角度进行回波脉冲压缩性能的

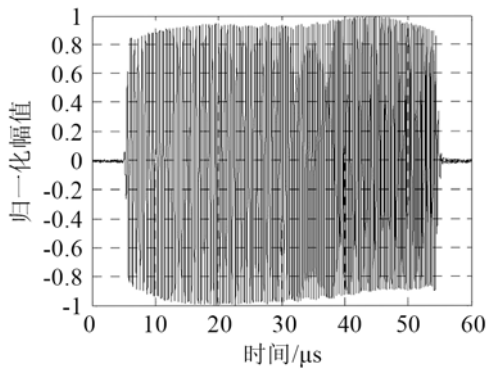


图 15 等幅线性调频信号激励换能器后波形
Fig.15 The equal amplitude chirp signal after transducer

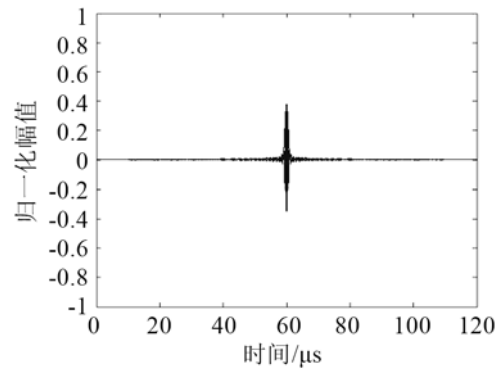


图 19 等幅线性调频信号激励换能器脉冲压缩结果及包络
Fig.19 The pulse compression output of the signal shown in Fig.15

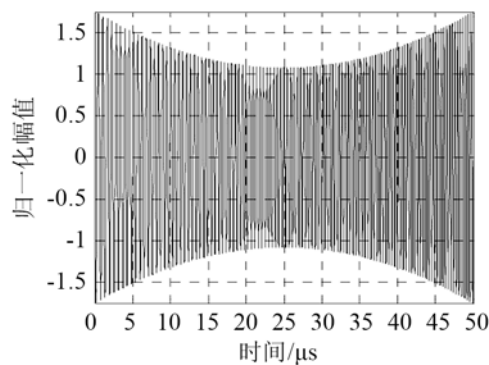


图 16 包络调制的调频信号
Fig.16 The envelope modulated chirp signal

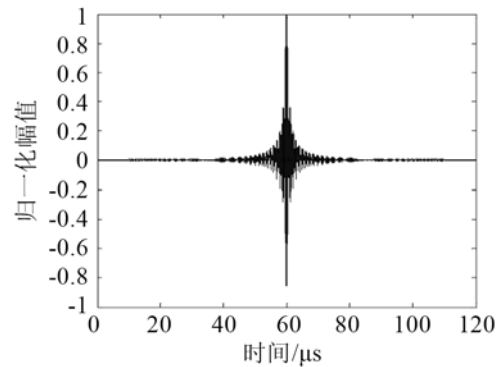


图 20 包络调制线性调频信号未激励换能器脉冲压缩结果及包络
Fig.20 The pulse compression output of the signal shown in Fig.16

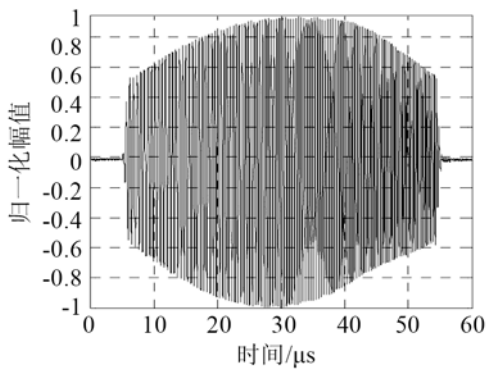


图 17 包络调制的线性调频信号通过换能器后波形
Fig.17 Envelope modulated chirp signal after transducer

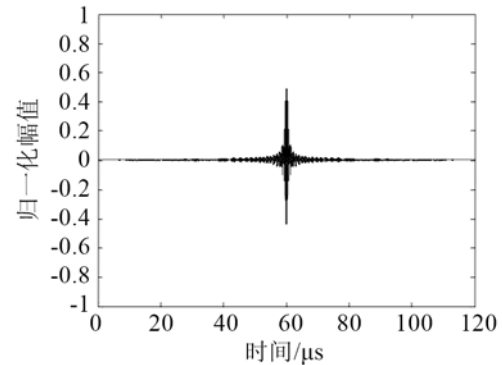


图 21 包络调制线性调频信号激励换能器脉冲压缩结果及包络
Fig.21 The pulse compression output of the signal shown in Fig.17

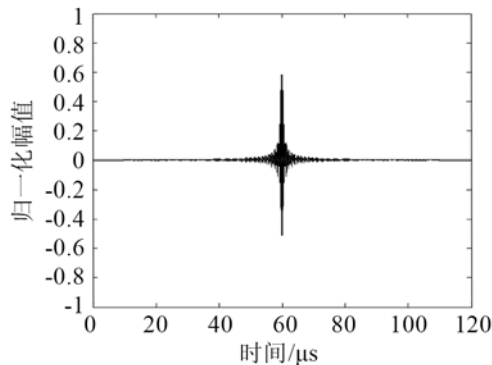


图 18 等幅线性调频信号未激励换能器脉冲压缩结果及包络
Fig.18 The pulse compression output of the signal shown in Fig.14

比对研究，由图 8~12、18~22 得出各信号脉冲压缩后归一化主瓣峰值及-3 dB 主瓣宽度，如表 1 所示。

计算距离旁瓣水平通常有两种方法，一种叫峰值旁瓣水平(Peak Sidelobe level, PSL)，用来衡量距离旁瓣的最高幅度；另一种叫平均旁瓣水平(Integrated Sidelobe level, ISL)，用来衡量距离旁瓣的总体能量。本文采用 PSL 来计算距离旁瓣水平，其定义如表达式(8)所示：

$$PSL = 20 \log \frac{\text{旁瓣峰值幅度}}{\text{主瓣峰值幅度}} \quad (8)$$

由图 12、22 和表达式(8)可计算出各信号脉冲压缩的峰值旁瓣水平，结果如表 2 所示。从表 2 可

表 1 换能器对各激励信号脉冲压缩结果的性能影响分析
Table 1 The impacts of the transducer on the pulse compression performances for different excitation signals

两种不同线性调频信号	等幅线性调频信号	包络调制线性调频信号
激励换能器前脉冲压缩归一化主瓣峰值(仿真/实验)	0.58/0.58	1/1
激励换能器后脉冲压缩归一化主瓣峰值(仿真/实验)	0.42/0.38	0.56/0.49
激励前后归一化主瓣峰值绝对损失(仿真/实验)	0.16/0.2	0.44/0.51
激励前后归一化主瓣峰值相对损失%(仿真/实验)	26.85/34.48	44/51
激励换能器前脉冲压缩-3dB 主瓣宽度 μs (仿真/实验)	1.009/1.009	0.875/0.875
激励换能器后脉冲压缩-3dB 主瓣宽度 μs (仿真/实验)	1.2/1.213	1.032/1.038
激励前后-3dB 主瓣加宽相对损失 μs (仿真/实验)	0.191/0.204	0.157/0.163
激励前后-3dB 主瓣加宽相对损失%(仿真/实验)	18.92/20.21	26.62/38.62

表 2 换能器对各信号脉冲压缩结果旁瓣峰值水平分析
Table 2 The impacts of the transducer on the peak sidelobe levels in pulse compression results for different excitation signals

两种不同 chirp 信号	激励换能器前脉冲压缩 峰值旁瓣/dB	激励换能器后脉冲压缩 峰值旁瓣/dB	激励前后峰值旁瓣 提高%
等幅 chirp 信号(仿真/实验)	-25.52/-20.52	-13.48/-13.48	12.04/7.04
包络调制 chirp 信号(仿真/实验)	-15.67/-13.35	-8.9/-8.9	6.77/4.45

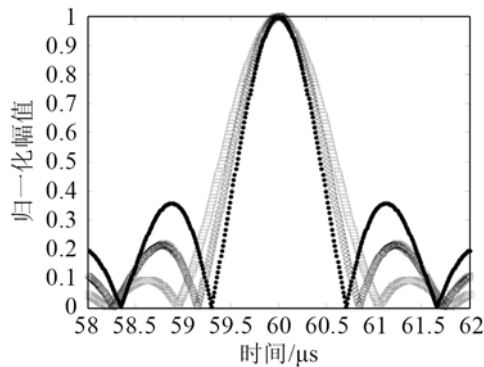


图 22 脉冲压缩包络脉宽对比仿真结果
Figure 22 The envelope waveforms of pulse compression outputs

可以看出, 包络调制线性调频信号在中心频段能量较低, 低频段和高频段能量较高, 而等幅线性调频信号所有频段能量分布都相等。激励换能器相当于乘以换能器单位脉冲频谱(如图 3 所示), 在低频段和高频段的能量衰减较大, 所以, 包络调制线性调频信号激励换能器的能量损失较大。

3 结 论

(1) 本文用等幅线性调频信号和包络调制线性调频信号激励换能器, 分析激励前后脉冲压缩的主瓣峰值和主瓣宽度, 探究换能器对脉冲压缩效果的影响, 得出激励后主瓣峰值降低, 主瓣宽度增加, 即激励换能器后脉冲压缩的信噪比和分辨率都有所降低。

(2) 包络调制线性调频信号激励换能器脉冲压缩的信噪比和分辨率高于等幅线性调频信号。但包

络调制线性调频信号激励换能器后能量损失较大。

(3) 等幅线性调频信号和包络调制线性调频信号激励换能器脉冲压缩峰值旁瓣水平都有所提高, 说明通过换能器后旁瓣被衰减大于主瓣衰减。

参 考 文 献

- [1] Matthew O'Donnell. Coded excitation system for improving the penetration of real-time phased-array imaging systems[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1992, 39(3): 341-351.
- [2] 陆锦辉, 是湘全, 丁庆海, 等. 随机二相码脉冲压缩雷达信号分析[J]. 电子学报, 1996, 24(6): 125-127.
LU Jinhui, SHI Xiangquan, Ding Qinghai, et al. Random two phase code pulse compression radar signal analysis[J]. Journal of electronic, 1996, 24(6): 125-127.
- [3] Mohammad R. Hoseini. Denoising ultrasonic pulse-echosignal using two-dimensional analytic wavelet thresholding. Department of Mechanical Engineer[C]// University of Alberta, Canada. April, IEEE, 2012, 45(3): 255-267.
- [4] 傅娟, 韦岗, 黄庆华. 基于幅度加权的预失真线性调频超声编码激励[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2): 494-498.
FU Juan, WEI gang, HUANG Qinghua. In the weighted amplitude predistortion linear frequency modulated ultrasonic coding incentive[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(2): 494-498.
- [5] 刘波. 基于脉冲压缩与二相编码激励的超声检测提高信噪比研究[J]. 电子学报, 2011, 39(11): 2701-2707.
LIU Bo. Based on pulse compression and two phase encoding incentive Gui ultrasonic testing to improve SNR of inquiry[J]. Acta Electronica Sinica, 39(11): 2701-2707.
- [6] 郑培创. 超声血流检测与成像技术研究[J]. 广州: 华南理工大学, 2012, 39(10): 270-275.
ZHENG Peichuang. Research on ultrasound blood flow detection and imaging technology[J]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012, 39(10): 270-275.
- [7] Jennifer E. Michaels. Chirp excitation of ultrasonic guided waves Georgia Institute of Technology[C]. Atlanta, IEEE, 2013, 53(1): 265-270.
- [8] 魏东, 周正干. 改进的非线性调频脉冲压缩方法在空气耦合超声检测中的应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(16): 8-13.
WEI Dong, ZHOU Zhenggan. Improved nonlinear frequency

- modulan pulse compression method in the application of air coupling ultrasonic testing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(16): 8-13.
- [9] Misaridis T, Jensen JA. Use of modulated excitatinsignals in medical ultrasound. part I: Basic concepts and expected benefits[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(2): 177-191.
- [10] 顾红, 苏卫民, 付耀先, 等. 一种提高二相编码雷达检测目标动态范围的方法[J]. 电子学报, 2002, 30(12): 1752-1754.
- GU Hong, SU Weimin, FU Yaoxian, et al. A method of enhancing the dynamic range of binary phase coded radars[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(12): 1752-1754.

• 简 讯 •

上海市声学学会召开第八次会员代表大会暨换届改选

上海市声学学会于 2014 年 9 月 26 日在上海市科学会堂召开了第八次会员代表大会, 进行四年一次的换届工作。140 名会员代表出席了会议。

会议由第八届理事会副理事长龚农斌主持, 上海市社团管理局社团管理处章震球同志出席了大会, 传达了有关社团工作的最新精神。对学会工作提出了 3 点希望: (1) 牢记学会服务宗旨, 搭建声学交流平台, 为会员做好服务工作; (2) 完善社团法人制度建设, 依法办会, 依章办会, 民主办会; (3) 搞好学术交流、学术调研和学术发展。

第八届理事会理事长孟昭文作了本届理事会的工作报告。他指出: 上海市声学学会第八届理事会在上海市科学技术协会的领导下, 在同济大学、中国科学院声学研究所东海研究站、中国船舶重工集团公司第 726 研究所、上海市现代建筑设计集团章奎生声学设计研究所、上海市第六人民医院和中华声学公司等声学单位的支持下, 在学会广大会员和干部的努力下, 根据上海市科协对所属及主管学会工作的要求和学会理事会对上海市声学学会的工作计划, 积极团结和组织上海市广大声学工作者, 为推动上海市声学学术领域的科学交流和发展、促进我国科学进步和社会主义经济建设作出了应有的贡献。从 9 个方面(1、学术交流; 2、对外交流; 3、为会员、企业或社会服务等其它工作; 4、科学普及活动; 5、组织建设; 6、编辑出版; 7、学会建设; 8、会员获奖情况; 9、今后努力方向)总结了 2010~2014 年期间学会开展的各种丰富多彩的活动, 着重总结了经过各声学单位和广大会员的共同努力, 学会已经形成的 4 个特色(1、学术交流方面: 创品牌, 海峡两岸声学学术交流会议, 有特色; 2、科技咨询方面: 服务社会, 以会养会, 设立“魏墨鑫声学发展基金”, 是本届理事会工作的一大亮点, 有特色; 3、出版刊物方面: 《声学技术》是中国科技核心期刊, 已被多个国外数据库收录, 有特色; 4、为会员做体检: 上海市第六人民医院超声科, 利用医院的优势, 每年为上海市声学学会会员做超声检查, 有特色)等。第八届理事会副理事长胡兵作了本届理事会的财务报告; 第八届理事会副理事长龚农斌作了学会章程修改的说明; 第八届理事会副理事长胡长青作了本届理事会换届筹备的工作报告。

大会通过无记名等额投票选举的方式产生了第九届理事会。



大会会场