

载频调制二相编码激励的超声成像信噪比提高研究

刘 波, 郭建中

(陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西省应用声学研究所, 陕西西安 710062)

摘 要: 针对压电陶瓷换能器的频带特性, 采用正弦波载频调制二相编码信号的激励方案, 研究换能器对单位码元载有不同周期载频的二相巴克码激励信号的影响, 分析回波的脉冲压缩处理结果, 优化调制参数, 探讨激励信号与换能器的最佳匹配方式. 利用本文提出的最佳调制参数的编码激励信号, 在多目标环境下对四根靶线的复杂回波进行脉冲压缩实验研究, 结果表明超声换能器对这种激励信号的响应及其回波的脉冲压缩效果理想, 可以极大地提高超声检测的信噪比.

关键词: 相位编码; 编码激励; 载频调制; 脉冲压缩

中图分类号: TB559 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 11-2701-07

Research on SNR Improvement in Ultrasonic Imaging by Coded Excitation with Carrier Modulation

LIU Bo, GUO Jian-zhong

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

Abstract: Considering the frequency spectrum of the piezoelectric ceramic transducer, this study uses a bi-phase coding signal modulated by a sine carrier as the excitation mode. Through using Barker code signal with each chip modulated by different periods of carrier, the transducer effect on the exciting signal and compression result is analyzed, modulation parameter is optimized, and the best matching mode between the exciting signal and the transducer is discussed. The echo of four target wires is processed by pulse compression with the optimum signal, the result shows that this excitation mode has a good performance on the transducer response, and it can enhance the SNR of the ultrasonic signal significantly.

Key words: phase-coding; coded excitation; carrier modulation; pulse compression

1 引言

医学超声检测限定了峰值及平均声功率, 传统超声诊断中, 为提高系统分辨率, 尽可能采用窄脉冲激励宽带换能器; 为提高检测深度及信噪比, 最大限度提高发射峰值声功率. 虽然峰值幅度接近最大允许值, 但平均声功率很低, 加上人体组织的衰减作用, 微弱回波信号易被噪声淹没.

雷达系统常使用编码激励及脉冲压缩方法提高发射平均功率^[1]. 应用于超声检测中, 文献[2]指出传统超声检测尽管峰值声功率接近安全标准上限, 但平均声功率却不到安全标准的 1%. 文献[3]指出在安全标准条件下使用编码激励及脉冲压缩可得到 15 ~ 20dB 的信噪比增益. 文献[4]采用相同能量不同位数的调制互补格莱码激励换能器, 从回波频谱分析角度说明窄带信号更适合于超声成像. 文献[5]采用单位码元载有 3 个周期

载频的 13 位巴克码信号激励换能器, 用失配滤波对回波处理后可得到 -90dB 的主旁瓣比值.

编码调制及脉冲压缩方法的原理为: 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^[6]. 二相编码的 TB 积变大, 在不增加峰值功率的前提下增强信号能量, 提高平均发射功率. 对长脉冲回波信号进行脉冲压缩处理后的信号幅值大大增强, 显著提高信噪比.

本文的主要工作包括: (1) 针对传统换能器频带特性, 用其特征频率作为载频调制二相编码信号, 激励超声换能器; (2) 研究换能器对激励信号及其脉冲压缩结果的影响, 针对换能器特性优化调制参数, 探讨激励信号与换能器的最佳匹配方式; (3) 进行多目标的编码激励及脉冲压缩的理论及实验研究.

2 原理及模型

2.1 载频调制二相编码激励原理

二相编码信号的相位调制函数只取 0 和 π 两值,其包络为矩形,可表示为

$$u(t) = v(t) * \frac{1}{\sqrt{P}} \sum_{k=0}^{P-1} c_k \delta(t - KT) \quad (1)$$

其中, * 表示卷积, $v(t)$ 为子脉冲函数, T 为其宽度, P 为码长. $u(t)$ 可理解为是 $v(t)$ 的加权组合,其频谱主要取决于子脉冲的频谱,其自相关函数主要取决于所用二元序列的自相关函数.

常用的二相编码中,互补格雷码由于两次发射机制,易受组织运动影响而效果变差^[7]. M 序列的周期自相关函数很理想,但脉冲方式非周期工作时旁瓣仍较高.巴克码的非周期自相关函数主旁瓣比和信噪比增益为脉冲压缩比(码长),具有 0,1 相间的良好非周期自相关特性,是较理想的编码压缩信号.为获得最大信噪比本文采用原始码元为(1,1,1,1,1,-1,-1,1,1,-1,1,-1,1)的 13 位最长巴克码,其自相关函数的主旁瓣比为 13,即 PSL(峰值旁瓣距离水平)为 -22.3dB.

2.2 脉冲压缩技术

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.二相编码信号通过匹配滤波后输出的自相关函数特性良好,但脉冲压缩后的旁瓣较高,可能会淹没多目标环境中旁瓣附近较小目标的主瓣.

超声检测中常见多目标复杂情况,为提高分辨率必须抑制旁瓣,但加窗处理对相位编码信号来讲既不能抑制旁瓣还会使脉冲压缩性能变差.本文采用最小均方滤波(LS)法设计二相编码信号的失配滤波器,使输出序列与期望序列的均方误差最小.

2.3 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,被接收换能器转换成电信号 $x(t)$,如式(2):

$$x(t) = e(t) * f(t) * h(t) + n(t) \quad (2)$$

其中,样品反射的传输特性为 $f(t)$,收、发换能器的等效响应为 $h(t)$, $n(t)$ 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:

$$\begin{aligned} r(t) &= (e(t) * f(t) * h(t) + n(t)) * e(t_0 - t) \\ &= (e(t) * e(t_0 - t) * f(t)) * h(t) + n(t) * e(t_0 - t) \end{aligned} \quad (3)$$

其中,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,在时域表现为压缩后的脉宽

被展宽,引起分辨率下降,在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.

3 仿真及实验研究

3.1 仿真研究

换能器冲激响应模型可用高斯包络的正弦信号来描述^[8],激励声压为

$$p(t) = \exp(-(\frac{\omega_0 t}{\sigma})^2) \sin(\omega_0 t + \theta) \quad (4)$$

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 2.5MHz、带宽为 1MHz 的换能器冲击响应高斯包络脉冲时长约 2.4 μ s,约 6 个震荡周期,仿真结果如图 1.

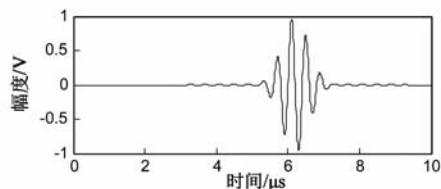


图1 换能器脉冲响应函数

3.1.1 基础码调制与载频调制二相码

文献[9~11]使用对原始二相码过采样后形成过采样序列,用基础序列与之线性卷积形成基础码调制二相码的组合码元来激励超声换能器.

在此基础上,本文采用正弦波载频调制二相码形成的调相信号激励换能器,用换能器特征频率(2.5MHz)作为载频,单位码元内分别载有 1~5 个周期载频的 13 位巴克码激励信号如图 2.

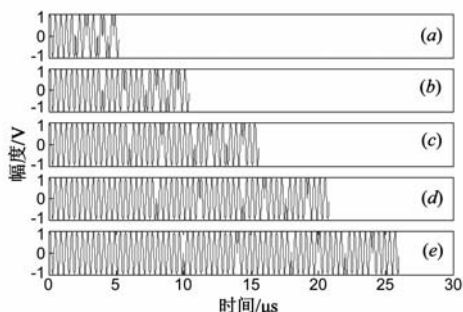


图2 单位码元分别载有 1-5 个周期载频的巴克码激励信号. (a)-(e) 分别为单位码元载有 1-5 个周期载频

3.1.2 载频调制二相码激励换能器后的信号及频谱

换能器发射的信号 $q(t)$ 可认为是角频率为 ω_0 的正弦波调制的 $u(t)$ 与 $p(t)$ 的卷积,如式(5),仿真结果如图 3.不同激励信号频谱及通过换能器后的频谱见图 4.

$$\begin{aligned} q(t) &= [u(t) \sin(\omega_0 t + \theta)] * p(t) \\ &= [(v(t) * \frac{1}{\sqrt{P}} \sum_{k=0}^{P-1} c_k \delta(t - KT)) \sin(\omega_0 t + \theta)] \end{aligned}$$

$$* (\exp(-(\frac{\omega_0 t}{\sigma})^2) \sin(\omega_0 t + \theta)) \quad (5)$$

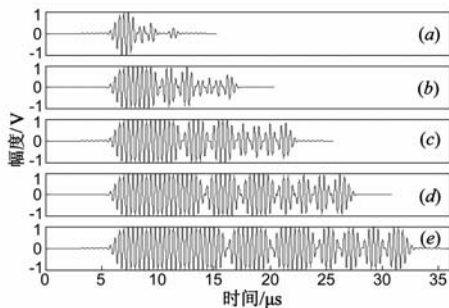


图3 不同激励信号通过换能器后的发射信号。(a)-(e)分别为单位码元载有1-5个周期载频

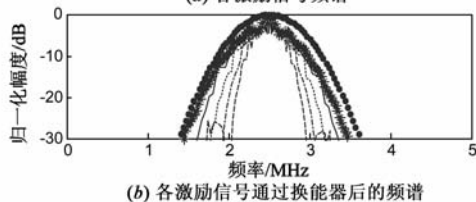
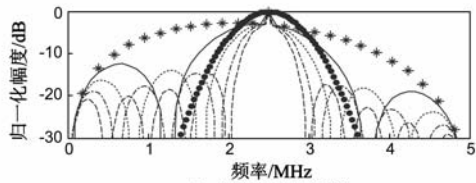


图4 激励信号频谱分析
 ...换能器频带特性;
 ***; —; ...; -·-·-分别为单位码元载有1-5个周期载频

3.1.3 匹配滤波脉冲压缩处理

图2所示的不同激励信号通过换能器后,接收信号的匹配滤波脉冲压缩结果见图5(a),假设激励信号不受换能器影响,无损失地通过,其脉冲压缩结果见图5(b)。脉冲压缩结果包络的-6dB脉宽比较如图6(a),与没有换能器影响时理想脉冲压缩后的-6dB脉宽相比较见图6(b)。

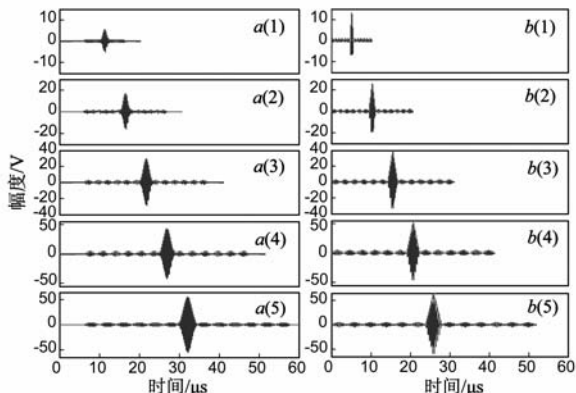
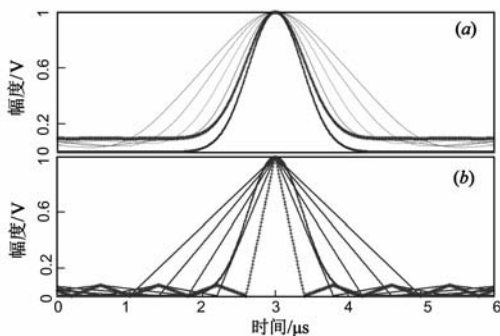


图5 匹配滤波脉冲压缩结果及包络。(a)各激励信号通过换能器后的发射信号对应结果;(b)换能器没有影响时的各激励信号对应结果;(1)~(5)单位码元分别载有1-5个周期载频)



...换能器脉冲响应;***;—;...;-·-·-表示载有1-5个周期载频
 图6 匹配滤波脉冲压缩结果包络脉宽对比。(a)各激励信号通过换能器后的发射信号;(b)换能器没有影响时理想脉冲

3.2 单根靶线实验

中心频率为2.5MHz, -3dB带宽为1MHz(2MHz~3MHz)的收、发两个换能器平行靠近摆放在水槽中,其远场声束方向放置直径为0.1mm的单根靶线。通过任意波形发生器(RIGOL DG3000)输出单位码元分别载有1~5个周期载频(2.5MHz)的13位巴克码调制脉冲信号,脉冲周期为100μs,通过功率放大器(ENI 350L,最大输出电压240V)后作为换能器的激励信号。接收换能器输出的靶线反射回波通过前置放大器(PANAMETRICS 5670)后,计算机控制数字示波器(RIGOL DS3000)采集,采样率为100MHz。实验装置框图如图7。

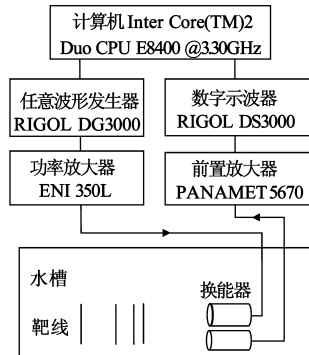


图7 实验装置框图

为从仿真和实验角度进行脉冲压缩性能的对比研究方便,调整功率放大器的激励电压及前置放大器的放大倍数,使得回波幅值与仿真(图3)的幅值一致。实测的5个不同激励信号对应的单靶线反射回波如图8。

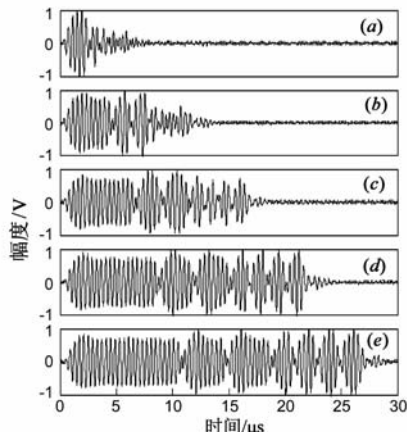


图8 实测不同激励信号对应的单靶线回波信号。(a)-(e)单位码元分别载有1-5个周期载频

匹配滤波脉冲压缩结果如图 9, 各实测回波频谱如图 10, 匹配滤波结果的 -6dB 包络脉宽比较见图 11.

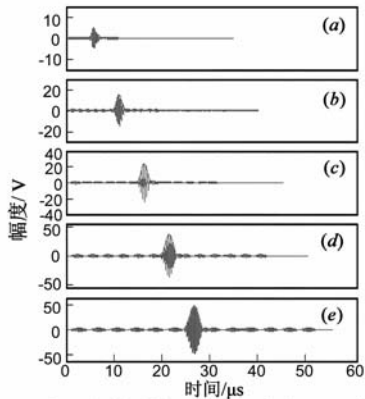


图9 实测各激励信号对应回波的匹配滤波脉冲压缩结果及包络。(a)-(e)单位码元分别载有1-5个周期载频

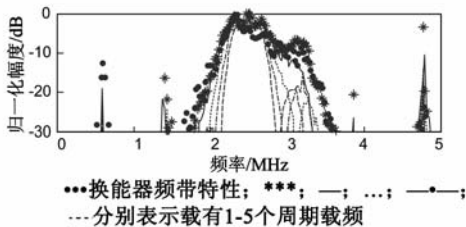


图10 实测各激励信号对应的单靶线回波频谱

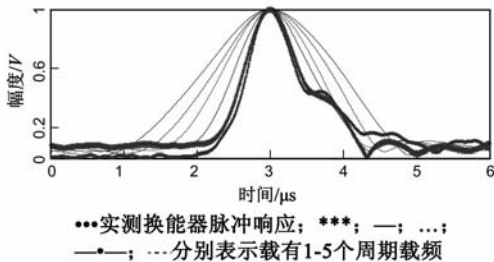


图11 实测换能器回波脉冲压缩结果包络脉宽对比

3.3 多目标实验

相同实验装置在换能器远场声束方向放置间距为 2,5,8(mm), 直径为 0.1mm 的四根靶线.

(1) 单脉冲激励. 任意波形发生器输出宽度为 0.2 μ s, 周期为 100 μ s 的单脉冲信号作为激励源, 采集的回波如图 12(a).

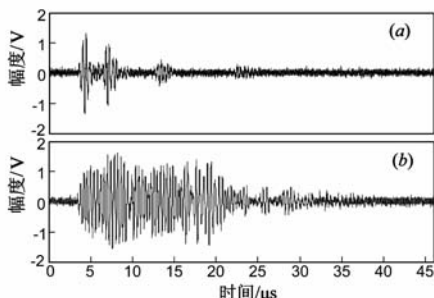


图12 实测四根靶线回波信号。(a)单脉冲激励;(b)13位巴克码编码激励

(2) 编码激励. 四根靶线及换能器位置不变, 任意波形发生器输出单位码元载有 3 个周期载频的 13 位巴克码调制信号, 通过功率放大器调整为与单脉冲激励模式相同幅度的激励电压作为编码激励信号, 脉冲周期为 100 μ s. 采集到的回波如图 12(b), 匹配滤波的脉冲压缩处理结果如图 13(a), 由于旁瓣较高, 需用失配滤波对其旁瓣进行抑制.

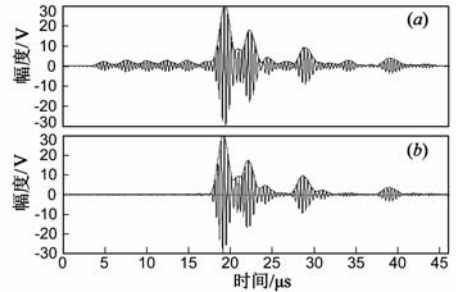


图13 实测四根靶线巴克码回波脉冲压缩结果及包络。(a)匹配滤波处理;(b)失配滤波处理

由最小均方逆滤波(LS)法设计的长度为 41 位的失配滤波器序列码元如图 14(a), 每个序列码元均被 3 个周期的载频调制, 构成的失配滤波器如图 14(b), 该失配滤波器对旁瓣抑制的结果如图 13(b).

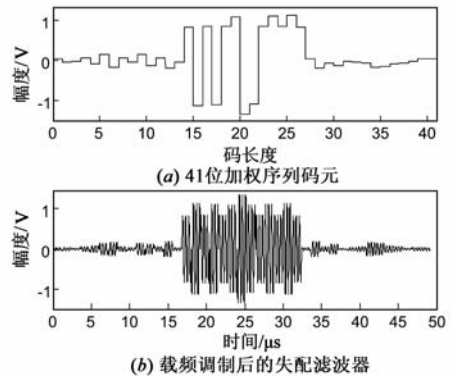


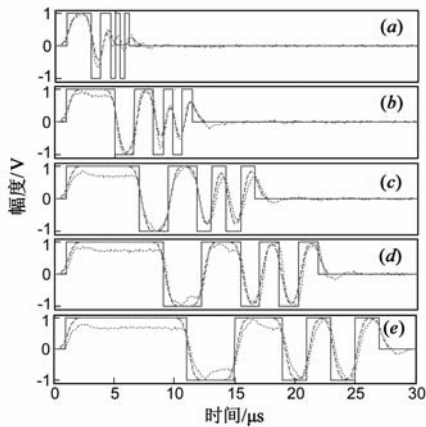
图14 失配滤波器的设计

4 结果和讨论

4.1 换能器对激励信号的影响

对仿真得到的图 2~ 图 4 和实验得到的图 8、图 9, 信号带宽取 -6dB 带宽, 用公式 $E = \int_{t_1}^{t_2} s^2(t) dt$ 求出信号能量, t_1 、 t_2 为信号 $s(t)$ 的起、止时间, 激励前后换能器对不同激励信号影响的统计结果如表 1.

(1) 时域分析. 由仿真信号(图 2、图 3)可看出, 激励信号通过换能器后有起震和余震拖尾过程, 信号被拖长; 码元变换的载频反相点被模糊, 成为不规则的 13 位巴克码调制信号; 各激励信号在激励前后的时域复包络变化如图 15(图 2、图 3、图 8 中信号复包络), 从各激励信号在激励前后的时域复包络变化可以看出, 巴克



— 仿真的各激励信号复包络..... 实测换能器接收回波复包络

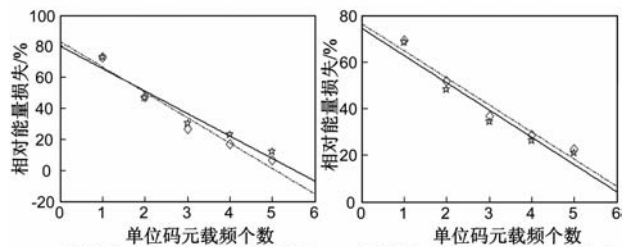
---- 仿真的各激励信号通过换能器后的信号复包络

图15 换能器对各激励信号时域波形的影响分析.

(a)-(e)分别表示载有1-5个周期载频

码元在 1, -1 之间的突发瞬时变换趋于平缓, 码元变换处形成过渡带, 位于后面的码元对应的复包络幅值有所下降, 是由于巴克码元在激励换能器时, 其矩形包络被换能器脉冲响应所平滑.

(2) 频域分析. 由激励前后的仿真信号频谱(图 4)和实测回波频谱(图 10)可看出, 换能器可等效为中心



(a) 激励前后各信号相对带宽损失 (b) 激励前后各信号相对能量损失

☆ 仿真数据点; ◇ 实验数据点; — 仿真拟合; —●— 实验拟合

图16 换能器对不同激励信号带宽和能量的影响拟合

频率为 2.5MHz, 带宽为 1MHz 的带通滤波器, 激励信号通过后带宽减小, 能量也衰减. 由表 1 对激励前后信号相对带宽损失和相对能量损失的拟合如图 16, 可见随着巴克码信号单位码元载频个数的增加, 各激励信号的带宽变窄, 能量变大, 通过换能器后其相对带宽损失和相对能量损失越小.

4.2 换能器对脉冲压缩性能的影响及调制参数优化

由仿真图 5、图 6 和实验图 9、图 11, 求出脉冲压缩后信号的信噪比增益 $\Delta = 10\lg A$ (dB), A 为压缩后脉冲最大幅值. 脉冲压缩后的脉宽取 -6dB 主瓣宽度, 得到换能器对不同激励信号脉冲压缩的性能影响分析如表 2.

表 1 换能器对各激励信号带宽和能量的影响分析

13 位巴克码信号的单位码元载频周期数	1 个周期载频	2 个周期载频	3 个周期载频	4 个周期载频	5 个周期载频
激励前 -6dB 带宽 B_1 (MHz)	2.289	1.086	0.719	0.538	0.429
激励后 -6dB 带宽 B_2 (MHz) (仿真/实验)	0.627/0.616	0.582/0.573	0.503/0.527	0.416/0.447	0.378/0.402
绝对带宽损失 ΔB (MHz) (仿真/实验)	1.662/1.673	0.504/0.513	0.216/0.192	0.122/0.091	0.051/0.027
相对带宽损失 $\Delta B/B_1$ (%) (仿真/实验)	72.610/73.090	46.410/47.280	30.040/26.710	22.680/16.910	11.890/6.300
激励前能量 E_1 (10^{-6} J)	2.600	5.200	7.800	10.400	13.000
激励后能量 E_2 (10^{-6} J) (仿真/实验)	0.826/0.804	2.689/2.509	5.117/4.938	7.692/7.413	10.290/10.084
绝对能量损失 ΔE (10^{-6} J) (仿真/实验)	1.774/1.796	2.511/2.691	2.683/2.862	2.708/2.987	2.710/2.916
相对能量损失 $\Delta E/E_1$ (%) (仿真/实验)	68.230/69.080	48.290/51.750	34.400/36.690	26.040/28.720	20.850/22.430

表 2 换能器对各激励信号脉冲压缩结果的性能影响分析

13 位巴克码信号的单位码元载频周期数	1 个周期载频	2 个周期载频	3 个周期载频	4 个周期载频	5 个周期载频
理想脉冲压缩信噪比增益 (dB)	11.139	14.150	15.911	17.160	18.129
实际脉冲压缩信噪比增益 (dB) (仿真/实验)	7.300/6.998	12.210/11.780	14.700/13.790	16.290/15.620	17.440/16.970
信噪比增益损失 (dB) (仿真/实验)	3.840/4.140	1.940/2.370	1.210/2.120	0.870/1.540	0.689/1.160
理想脉冲压缩 -6dB 主瓣宽度 (μ s)	0.400	0.800	1.200	1.600	2.000
实际脉冲压缩 -6dB 主瓣宽度 (μ s) (仿真/实验)	1.026/0.888	1.211/1.214	1.534/1.489	1.907/1.789	2.298/2.133
-6dB 主瓣加宽系数 (仿真/实验)	2.565/2.220	1.514/1.518	1.278/1.241	1.192/1.118	1.149/1.107

(1) 信噪比损失. 由激励前后的频谱(图 4 和图 10)可知, 经过换能器后, 激励信号的带宽和能量减小, 输出信号信噪比增益降低, 脉冲压缩性能下降. 与换能器带宽相比激励信号带宽越大则通过换能器后相对带宽减小量、相对能量损失以及脉冲压缩性能损失都增大. 由仿真和实验的脉冲压缩输出信号幅值(图 5 和图 9)

和表 2, 对信噪比增益损失拟合如图 17(a), 可见随着巴克码单位码元载频个数的增加, 脉冲压缩输出信号的信噪比增加, 激励换能器前后的信噪比增益损失减小. 单位码元载有 1, 2 个周期载频的巴克码信号经过换能器后脉冲压缩结果信噪比增益损失很大, 单位码元载有 3, 4, 5 个周期载频的巴克码信号通过换能器后能

量损失相对较少,脉冲压缩后信噪比增益损失较少.

(2)分辨率损失.依据图 6(a)、图 6(b)及图 11 中包络的 -6dB 宽度,可见由于换能器的影响,使脉宽展宽,分辨率降低.由表 2 数据,比较压缩后的脉冲主瓣 -6dB 宽度和主瓣加宽系数可见随着巴克码信号单位码元载频个数的增多,脉冲压缩后主瓣的 -6dB 宽度增加,主瓣展宽系数减小,分辨率损失减小.主瓣加宽系数拟合如图 17(b),可见单位码元载有 1,2 个周期载频的巴克码信号理想脉冲压缩的 -6dB 脉宽都小于换能器脉冲响应 -6dB 脉宽,通过换能器后均被展宽,大于换能器脉冲响应的 -6dB 脉宽,相对分辨率损失很大.单位码元载有 4,5 个周期载频的巴克码信号处理后虽然相对分辨率损失较小,但由于本身码元宽度比换能器脉冲响应宽度大,分辨率太低,经过换能器后进一步降低.

(3)综合考虑信噪比和分辨率.由于单位码元载有 3 个周期载频的巴克码信号带宽和换能器带宽接近,通过换能器后能量衰减的程度相对不大,信噪比损失相对较小,且压缩后被展宽的主瓣脉宽与换能器脉冲响应脉宽较接近,分辨率损失相对较小,在分辨率损失不大的情况下,可得到相对较高的脉冲压缩输出信噪比.单位码元载有 3 个周期载频的巴克码调制信号为最佳激励信号.

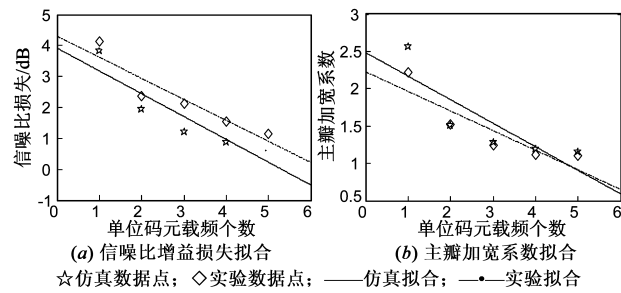


图 17 换能器对各激励信号脉冲压缩结果的性能影响拟合

4.3 多目标的脉冲压缩性能分析

(1)多目标的分辨率.

四根靶线的巴克码回波失配滤波结果(图 13(b))与匹配滤波结果(图 13(a))对比可见,旁瓣被很好地抑制.换能器发射脉冲信号的持续时间为巴克码信号与换能器脉冲响应的时间之和,大约为 $18\mu\text{s}$,可分辨的最小距离约为 13.5mm ,四根靶线各自反射的回波信号已经混叠,最后一根靶线的回波由于衰减被噪声淹没.失配滤波处理后恢复的四个窄脉冲幅值有很大提高.回波之间的返回时间差就是压缩后脉冲峰值之间的时间差.从图 13(b)中得到四个压缩后的脉冲峰值间隔,可求出四根靶线间距为 $2.20, 4.89, 7.82(\text{mm})$,由于有一小部分噪声和旁瓣的干扰,实测靶线间距与真实靶线间距有一定误差.

(2)编码激励的信噪比.

比较编码激励(图 12(b))与单脉冲激励(图 12(a))的检测方式,由于信号衰减,两种检测方法中最后一根靶线的回波信号($20 \sim 25\mu\text{s}$ 之间)都很微弱且被噪声淹没.脉冲压缩处理后,编码激励信号的脉冲可以从噪声中恢复,单脉冲检测信号却无法提取.编码激励检测在损失少许分辨率的同时信噪比得到了显著提高.

5 结论

(1)本文采用单位码元载有不同周期载频的 13 位巴克码载频调制信号来激励换能器,分析了激励前后信号的波形变化、相对带宽损失及相对能量损失,在时域和频域研究了换能器对不同激励信号的影响;针对信噪比增益损失和主瓣展宽系数,探讨换能器对脉冲压缩效果的影响,得出频带特性与换能器频带最接近的激励信号,即单位码元载有 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.

(2)用失配滤波器对四根靶线的回波进行脉冲压缩处理,混叠在一起的 4 个低信噪比的宽脉冲被压缩为幅值大大提高的 4 个窄脉冲,旁瓣被很大程度地抑制.与传统单脉冲检测相比,编码激励检测在分辨率少许损失的情况下信噪比大大提高,增强了信号检测能力,该激励方式可以很好地应用在超声成像系统.

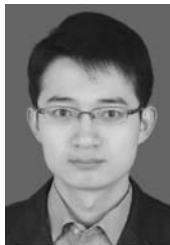
(3)由于换能器的影响,输出信号的信噪比和分辨率与理想脉冲压缩还有差距,若能在信号处理过程中将换能器的影响尽量减小,脉冲压缩的超声检测及成像效果会更好.

参考文献

- [1] 陆锦辉, 是湘全, 丁庆海, 王敏. 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 Jin-hui, SHI Xiang-quan, DING Qing-hai, WANG Min. Analysis of random binary phase-coded pulse radar signal[J]. Acta Electronica Sinica, 1996, 24(6): 125 - 127. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] Pai-chi Li, Emad Ebbini, Matthew O'Donnell. A new filter design technique for coded excitation systems[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1992, 39(6): 693 - 699.
- [4] Ihor Trots, Andrzej Nowicki. Transducer bandwidth influence on the Golay encoded ultrasound echoes[A]. Proceedings of the Ultrasonics Symposium[C]. New York, USA: IEEE, 2007. 1274 - 1277.
- [5] Chang-hong Hu, Qi-fa Zhou. Mismatched-filter design for

- biphase-coded pulse for high frequency ultrasound imaging [A]. Proceedings of the Ultrasonics Symposium [C]. Vancouver, Canada; IEEE, 2006. 2222 – 2225.
- [6] 顾红, 苏卫民, 付耀先, 刘国岁. 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 Wei-min, FU Yao-xian, LIU Guo-Sui. A method of enhancing the dynamic range of binary phase coded radars [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(12): 1752 – 1754. (in Chinese)
- [7] 张成, 赵晓群. 二元互补序列的特征序列[J]. 电子学报, 2004, 32(5): 819 – 824.
ZHANG Cheng, ZHAO Xiao-qun. The feature sequence of complementary sequences[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(5): 819 – 824. (in Chinese)
- [8] 谷金宏, 王素品, 万明习. 发射调频信号提高医学超声图像的信号噪声比[J]. 西安交通大学学报, 2006, 6(41): 741 – 745.
GU Jin-hong, WANG Su-ping, WAN Ming-xi. Transmitting frequency-modulated signal to increase signal-to-noise ratio of medical ultrasound image[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 6(41): 741 – 745. (in Chinese)
- [9] Richard Y Chiao, Xiao-hui Hao. Coded excitation for diagnostic ultrasound: a system developer's perspective [A]. Proceedings of the Ultrasonics Symposium [C]. Milwaukee, USA; IEEE, 2006. 437 – 448.
- [10] Matthew O'Donnell, Yao Wang. Coded excitation for synthetic aperture ultrasound imaging [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(2): 171 – 176.
- [11] Heng Zhao, Larry Y Mo, Shang-kai Gao. Barker-coded ultrasound color flow imaging: theoretical and practical design [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(2): 319 – 331.

作者简介



刘 波 男, 1985 年 11 月出生于陕西榆林, 现为陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西省应用声学研究所硕士研究生, 主要研究方向为超声信号处理.



郭建中(通讯作者) 男, 1967 年 1 月出生于陕西西安, 声学博士, 现为陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西省应用声学研究所副教授. 主要研究方向为医学超声、超声信号检测及处理.

E-mail: guojz@snnu.edu.cn;
guojz.snnu@hotmail.com