

吴何珍, 刘政一. 不同周期载频调制二进制编码激励脉冲压缩仿真研究[J]. CT 理论与应用研究, 2013, 22(1): 41-51.  
Wu HZ, Liu ZY. Simulation study on pulse compression by bi-phase coded excitation with carrier modulation[J]. CT Theory and Applications, 2013, 22(1): 41-51.

## 不同周期载频调制二进制编码 激励脉冲压缩仿真研究

吴何珍<sup>✉</sup>, 刘政一

(中国地震局地球物理研究所地震观测与地球物理成像重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 本文为将编码技术引入地震探测中, 在分析编码激励基本原理的基础上, 开展了编码激励的数值模拟研究, 掌握编码激励的规律和特点。通过激励编码信号的调制发射, 对接收信号进行脉冲压缩的仿真研究。其次通过单位码元载有 1 至 5 个载频周期个数的 13 位 Barker 码调制信号激励换能器(通过发射载有 1 至 5 个载频周期的 13 位 Barker 码调制信号来激励换能器), 对接收信号进行脉冲压缩仿真研究和频谱分析, 分析了换能器性能对编码激励信号及其脉冲压缩结果的影响。

**关键词:** 地震探测; 载频调制; Barker 码; 脉冲压缩

**文章编号:** 1004-4140 (2013) 01-0041-11    **中图分类号:** P 631    **文献标志码:** A

编码技术在雷达、医学等方面已经得到广泛的成功应用。为将其引入地震探测中, 需要开展编码激励的数值模拟研究, 掌握编码激励及脉冲压缩的规律和特点。编码技术中, 编码激励的原理主要是通过发射一串长的编码信号, 来增强信号的能量, 达到提高平均发射功率的效果<sup>[1]</sup>。

由于系统的穿透深度和分辨率之间存在着矛盾, 需要利用匹配滤波器或者失匹配滤波器对长脉冲接收信号进行脉冲压缩, 压缩后信号与单脉冲通过换能器接收到的信号相比在幅值上可以大大增强, 能显著提高接收信号的信噪比, 提高系统的轴向分辨力<sup>[2-4]</sup>。

在医学上, 为了提高超声成像的质量, Ihor 等<sup>[5]</sup>利用 Golay 互补序列抵消距离旁瓣的原理, 和相同能量不同位数的两列载频调制 Golay 码信号, 通过接收信号的频谱分析, 可知频带宽度窄的信号更适合用于超声成像; Hu 等<sup>[6]</sup>对 13 位 Barker 码信号进行多个周期载频的调制, 用调制后的信号激励换能器, 对接收信号采用失配滤波器脉冲压缩处理后可得到较好的主旁瓣比值。

本文将在分析编码激励基本原理的基础上, 通过激励不同周期载频调制的二进制编码信号, 对接收信号进行脉冲压缩的处理。

---

收稿日期: 2012-07-28。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41104117)资助。

## 1 方法原理

### 1.1 二进制编码信号的特点

常用的编码信号有线性调频 Chirp 信号、相位编码 Barker 码、Golay 码和 M 序列，这些编码信号各有其优缺点。其中 Golay 码是由两个互补序列构成，对两次发射的 Golay 互补序列，经过匹配滤波后将两个压缩脉冲相加，从理论上讲能够完全抵消距离旁瓣，但由于需要经过两次发射，对编码系统的要求较高，容易受到编码系统的影响，导致效果变差；Barker 码发射电路简单，但是最大长度只有 13 位，信噪比增益较低<sup>[7]</sup>。本节将着重介绍二进制编码，通过 Barker 码来说明编码激励的原理。

通常相位编码信号都具有大的时宽带宽积、较好的分辨率，平均功率较大等特点。其码元的宽度越小，则带宽越大，长二元序列可以得到大脉冲压缩比<sup>[8]</sup>。Barker 码是一种很理想的二进制码。最短的 Barker 码的长度为 2 位，最长的为 13 位，因此对 Barker 码来说所能达到的最大的主峰与副峰之比为 13。图 1 为不同长度的 Barker 码，一般为了得到最大信噪比，均采用 13 位 Barker 码进行编码激励。

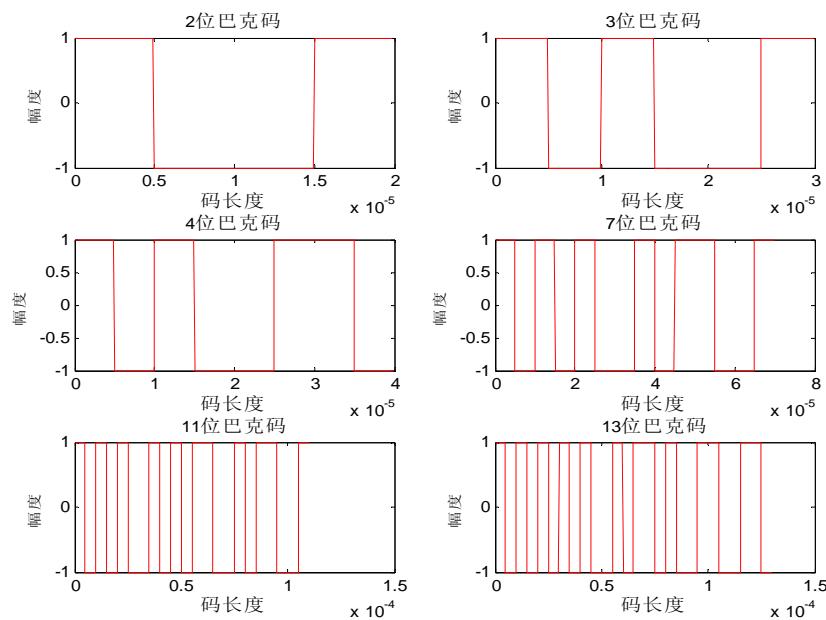


图 1 不同长度的 Barker 码序列

Fig. 1 Barker code sequences of different lengths

Barker 码是具有良好自相关特性（自相关为  $\delta$  函数）的二进制编码信号。它的自相关函数为：

$$X(k) = \begin{cases} N, & k = 0 \\ \pm 1, & k \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中副瓣  $|x(k)| \leq 1, k \neq 0$ ，非常理想，如图 2 所示。

## 1.2 脉冲压缩原理

为了取得和传统单脉冲激励时相近的轴向分辨率, 需要对接收信号进行脉冲压缩(pulse compression)处理, 或称解码(decoding), 它主要是通过脉内调频或调相、调幅来展宽信号的频谱。最常用的脉冲压缩方法是匹配滤波法, 脉冲压缩的效果可以由信噪比和范围旁瓣水平(Range SideLobe Level, RSLL)来定量衡量。

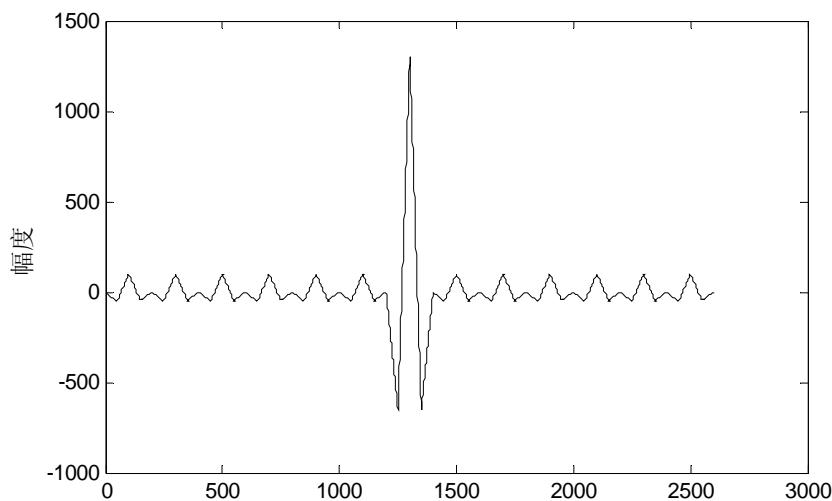


图 2 13 位 Barker 码的自相关函数  
Fig. 2 Autocorrelation function of 13 Barker code

二进制编码信号通过匹配滤波器后可以输出主旁瓣特性良好的自相关函数, 所以一般选择匹配滤波作为脉冲压缩技术<sup>[9]</sup>。匹配滤波器的频域传输函数为输入信号频谱的共轭, 其时间域的冲击响应函数是输入信号的镜像在时间上平移最大信噪比时刻的结果<sup>[10]</sup>。

对于编码信号脉冲压缩处理来说, 一般而言, 将解码过程中产生的旁瓣(因为这不是真实的信号)视为噪声, 接收信噪比定义为信号峰值幅度与噪声平均幅度之比, 这在医学超声成像中称为 RSLL<sup>[11]</sup>。对于信噪比 RSLL, 可以通过编码的方式加以提高。通常的数字编码(包括伪随机编码等), 信噪比增益(以分贝来表示)取决于码长  $M$ <sup>[12]</sup>:

$$\text{SNR}_{\text{inh}} = 10 \log M \quad (2)$$

由公式(2)可知, 编码序列长度每增加一倍, 信噪比增益提高 3 dB。实际应用中, 由于脉冲压缩采用非匹配滤波器以及受到噪声、岩样衰减等因素影响, 无法达到理想情况, 所获得信噪比的提升均小于理论值。

距离旁瓣水平 RSLL 定义为主瓣峰值  $\max(A_{\text{main\_lobe}})$  与旁瓣平均值  $\max(A_{\text{side\_lobe}})$  之比:

$$\text{RSLL} = 20 \log 10 \frac{\max(A_{\text{main\_lobe}})}{\frac{1}{T} \int_0^T A_{\text{side\_lobe}}(t) dt} \quad (3)$$

RSLL 是数字编码应用中的关键因素，可以以相同条件下脉冲压缩产生的距离旁瓣水平最低为判断标准，定量衡量脉冲压缩的效果。

## 2 编码激励脉冲压缩仿真研究

二进制编码信号的自相关函数主要取决于所采用的二元序列的自相关函数，通过载频对具有良好自相关特性的二元序列进行调制，就可以得到良好自相关特性的二进制编码信号。通过基础码调制二进制码后形成的组合码来直接激励换能器的方式，首先对原始二进制码过采样形成过采样序列，然后用基础序列与过采样序列做线性卷积形成组合信号码元用来激励超声换能器<sup>[11, 13-16]</sup>。针对压电陶瓷换能器的单频特性，本文采用单位码元载有不同载频个数的 13 位 Barker 码调制信号激励换能器进行研究。

### 2.1 二进制码调制原理

超声换能器的冲激响应函数模型可以用高斯包络的正弦信号来描述。从已有的实验结果看，激励电脉冲宽度为换能器特征频率振荡周期的一半时，激励效果达到最佳<sup>[17-20]</sup>。以中心频率为 100 kHz 的换能器为例，可采用的激发电脉冲宽度最优为 5 μs，激励后的高斯包

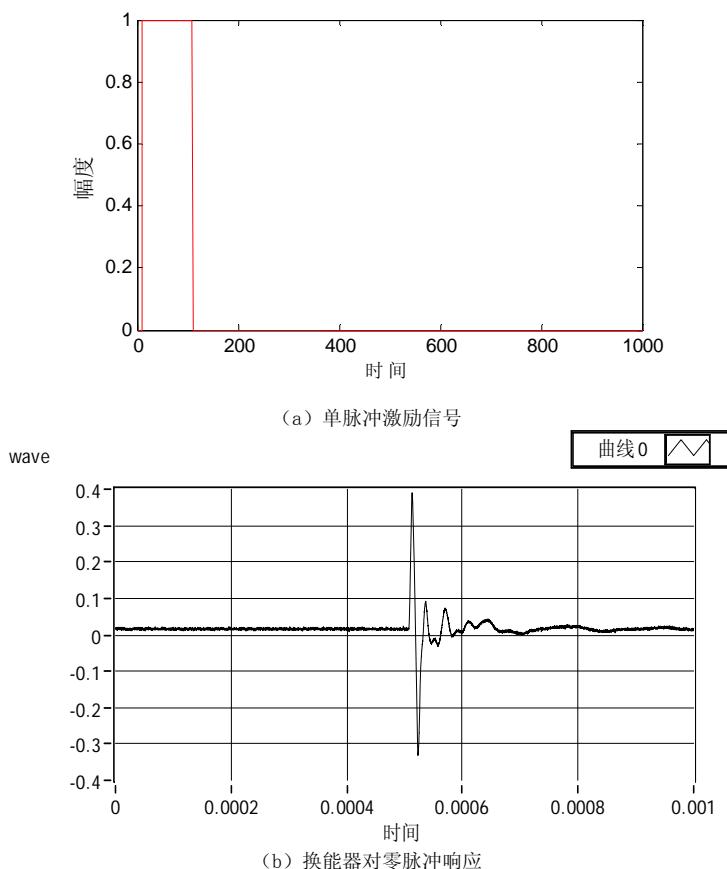


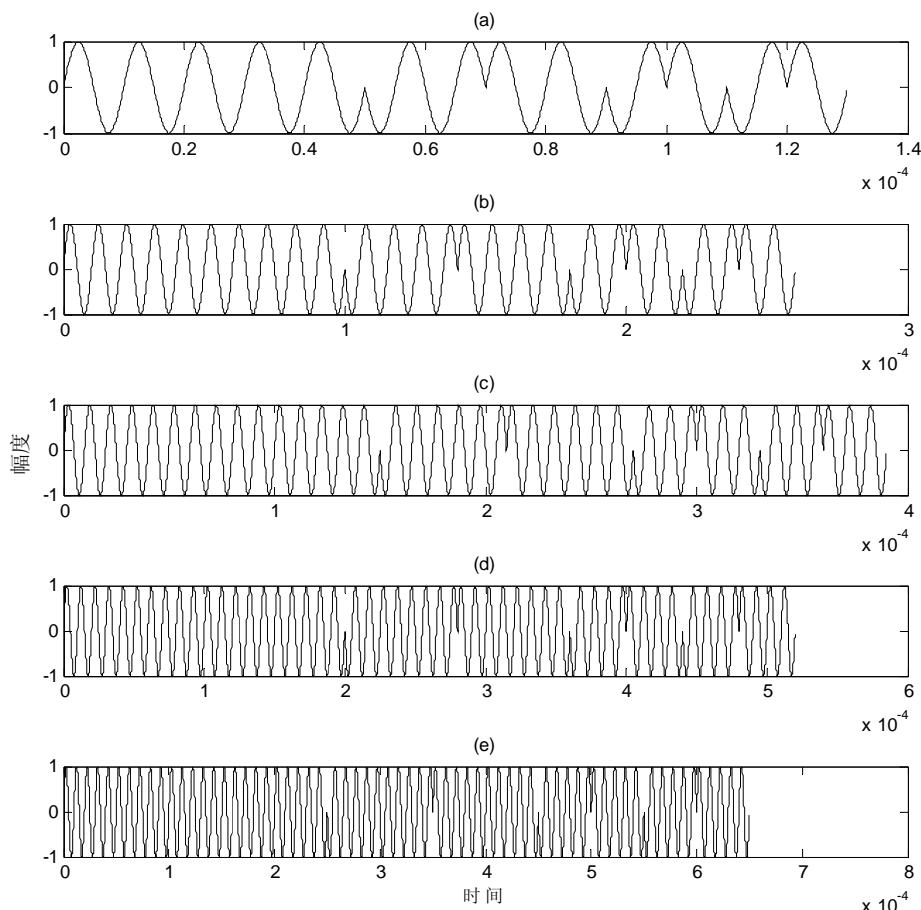
图 3 单脉冲激励信号及换能器对零脉冲响应

Fig. 3 Single-pulse excitation signal and zero pulse response of transducer

络脉冲持续时间大约为  $60\mu s$ , 即约为 6 个完整震荡周期, 每个周期为  $10\mu s$ 。以单脉冲为例, 仿真结果如图 3 所示, 图 3 (a) 是满足激励条件的单脉冲信号, 图 3 (b) 是换能器对零脉冲响应。

## 2.2 载频调制 Barker 二进制码

为了寻找到激励信号与换能器的最佳匹配方式, 使换能器最好地响应激励信号, 分别用换能器特征频率的载频, 即中心频率为  $100\text{ kHz}$  的载频调制单位码元宽度不同的 13 位 Barker 码。图 4 显示单位码元内分别载有 1 至 5 个周期载频的 13 位 Barker 码激励信号。



(a) 载有 1 个周期载频; (b) 载有 2 个周期载频; (c) 载有 3 个周期载频;  
(d) 载有 4 个周期载频; (e) 载有 5 个周期载频

图 4 单位码元内分别载有不同周期载频的 13 位 Barker 码激励信号

Fig. 4 13 Barker code excitation signal with unit code element with different cycles of carrier frequency

## 2.3 载频调制二进制码激励换能器后的信号及其频谱

换能器实际发射的信号为 Barker 码激励信号与换能器脉冲响应函数的线性卷积。不同激励信号的频谱如图 5 所示。这些不同激励信号通过换能器对零后的频谱如图 6 所示。通

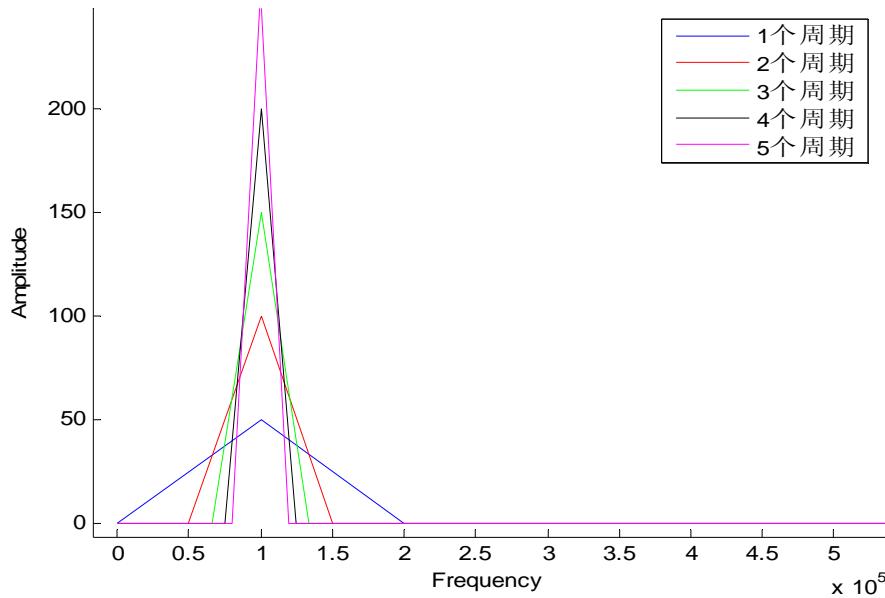


图 5 单位码元内分别载有不同周期载频的 13 位 Barker 码激励信号频谱

Fig. 5 13 Barker code excitation signal frequency spectrum with unit code element with different cycles of carrier frequency

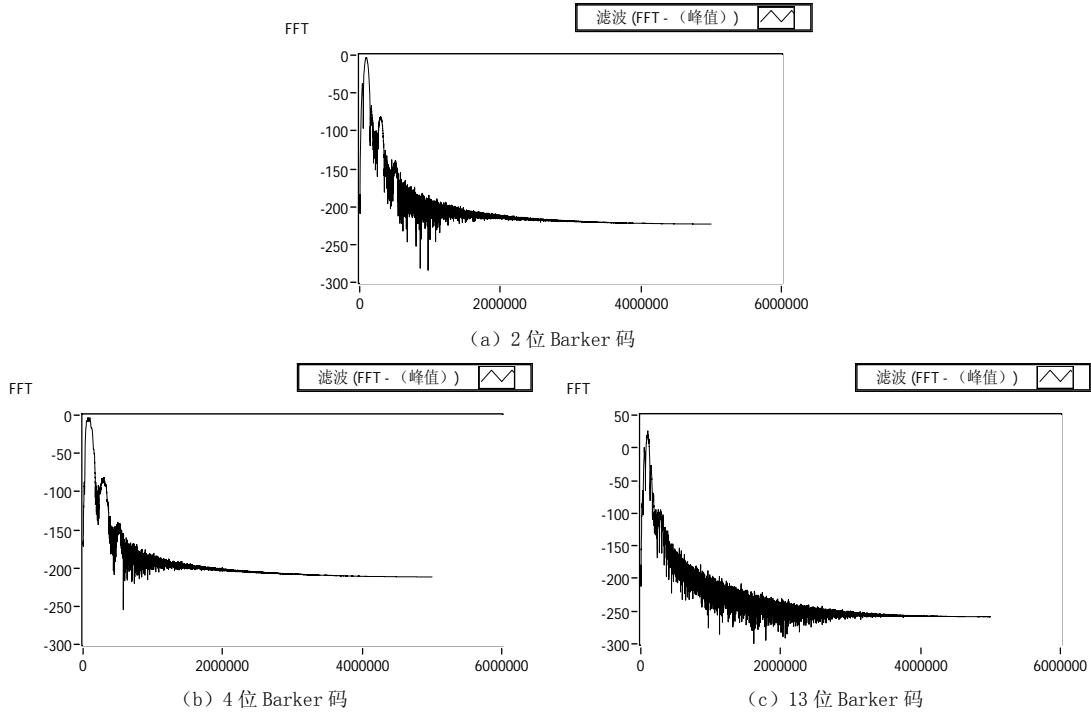
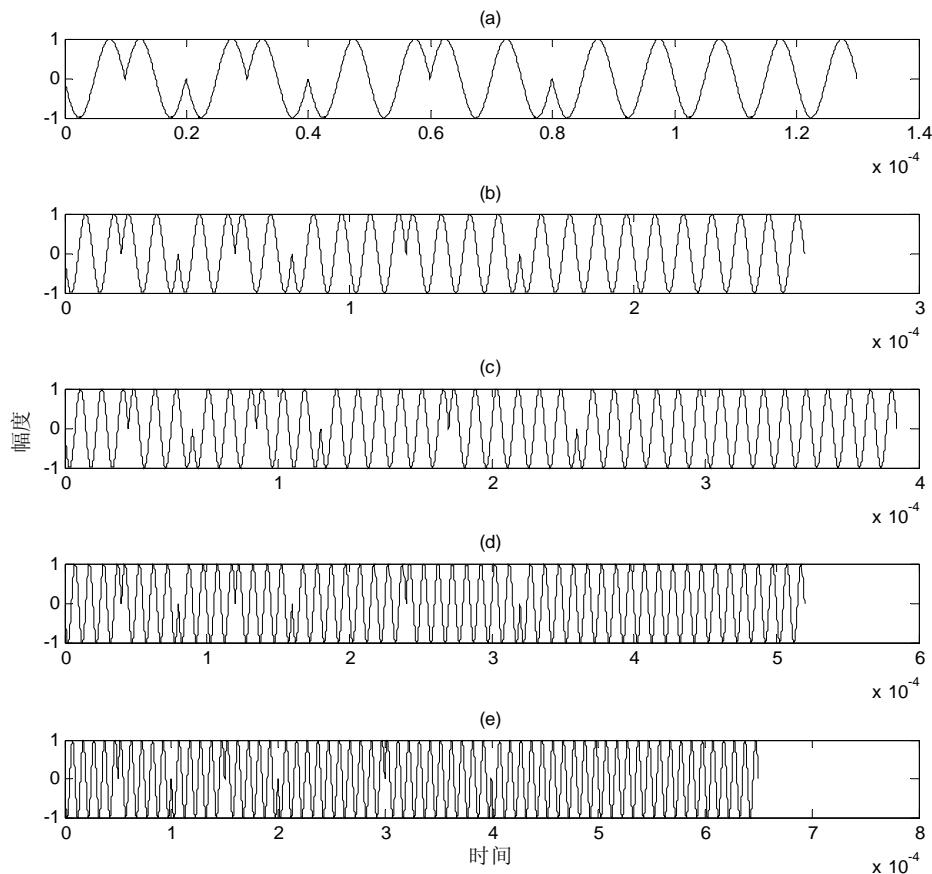


图 6 不同激励信号通过换能器对零后的频谱

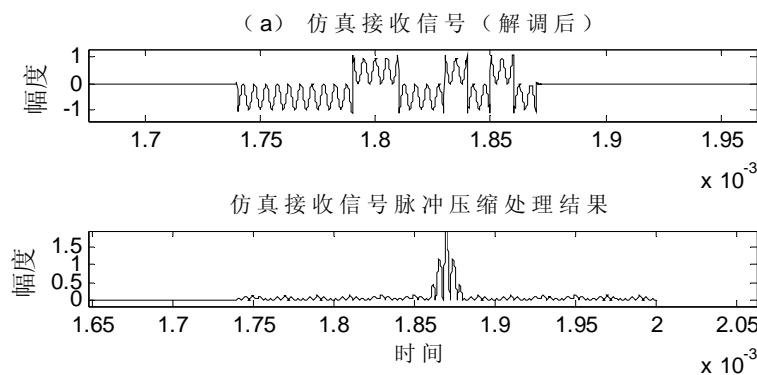
Fig. 6 Different excitation signal frequency spectrum after transducer turning back to zero



(a) 载有 1 个周期载频; (b) 载有 2 个周期载频; (c) 载有 3 个周期载频;  
 (d) 载有 4 个周期载频 (e) 载有 5 个周期载频

图 7 不同激励信号分别对应的匹配滤波函数

Fig. 7 Matching filtering function with different excitation signal



(a) 载有 1 个周期载频; (b) 载有 2 个周期载频; (c) 载有 3 个周期载频;  
 (d) 载有 4 个周期载频; (e) 载有 5 个周期载频

图 8 单位码元内分别载有不同周期载频的 13 位 Barker 码接收信号脉冲压缩处理结果  
 Fig. 8 Pulse compression results of 13 Barker code received signal with unit

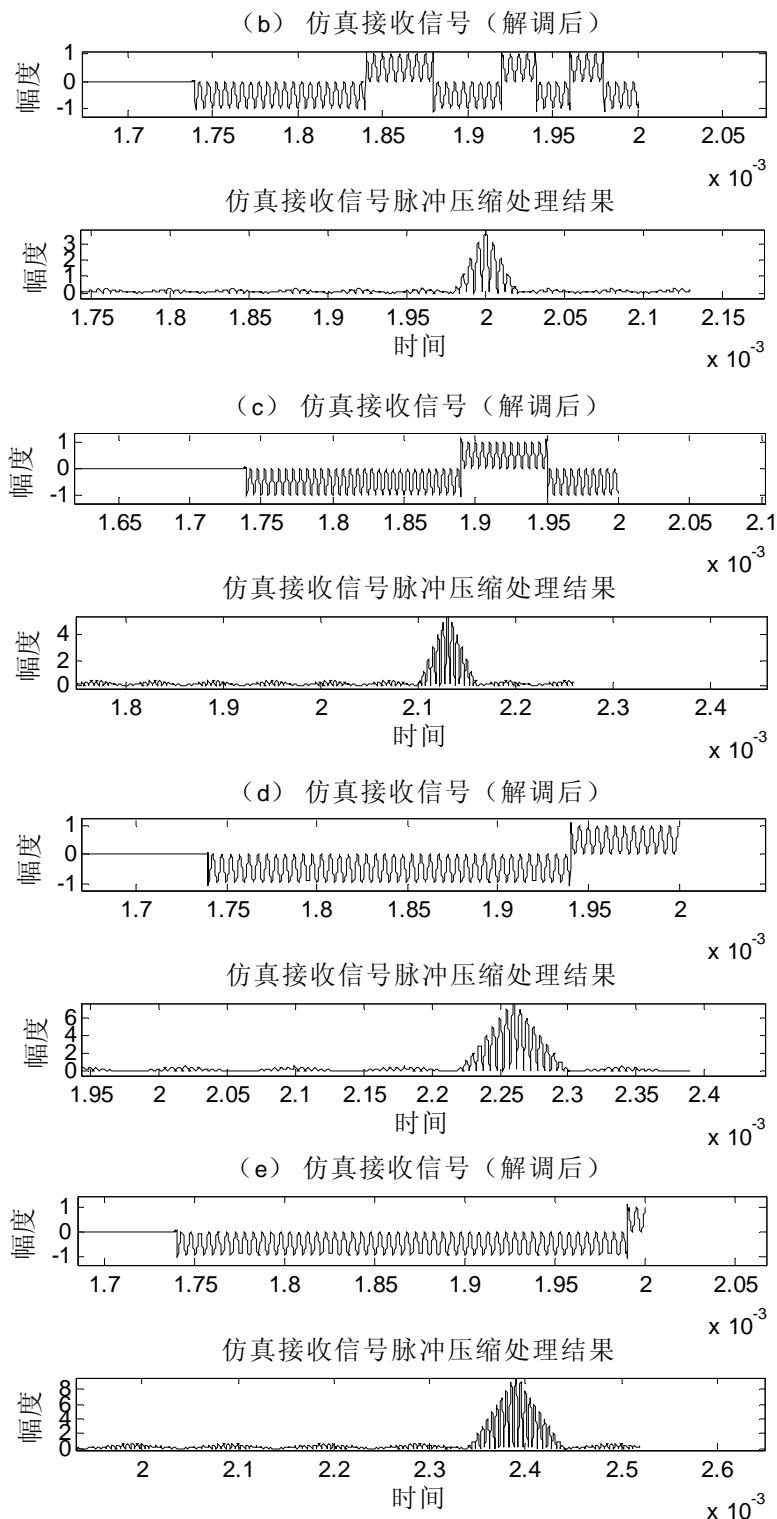


图 8 单位码元内分别载有不同周期载频的 13 位 Barker 码接收信号脉冲压缩处理结果 (续)  
Fig. 8 Pulse compression results of 13 Barker code received signal with unit (continued)

过图 4、图 5 及图 6 的对比, 可以看出虽然对激励信号进行了调制, 调制后的激励信号也没有丢失任何编码信息, 但是通过换能器转换成超声信号后, 由于受到换能器自身的频带和转换效率限制, 换能器发射的编码超声信号已经发生了很大的变形(图 6), 由此可见要将编码技术应用到超声探测中, 首先需要了解换能器性能对编码激励信号的影响, 以此来提高换能器性能。

#### 2.4 匹配滤波脉冲压缩仿真处理

对不同仿真激励信号进行镜像信号平移, 可以得到对应的匹配滤波器也即匹配滤波函数, 如图 7 所示。不同的激励信号通过匹配滤波脉冲压缩仿真处理, 得到结果如图 8 所示。

从接收信号脉冲压缩处理的结果看, 单位码元载有 3 个周期载频的 Barker 码信号仿真后, 信噪比的损失相对较小, 脉冲宽度与换能器的脉冲响应宽度较接近; 而单位码元载有 1、2 个周期载频的 Barker 码信号仿真后, 信噪比和分辨率的损失都相对较大; 单位码元载有 4、5 个周期载频的 Barker 码信号仿真后虽然能量大, 信噪比损失和主瓣加宽系数都较小。由此可知为了激励换能器的脉冲压缩效果达到最佳, 单位码元周期载频个数需要根据具体信号频带宽度和换能器频带宽度接近程度来选择。

### 3 结论

本研究在分析编码激励基本原理的基础上, 开展了编码激励的数值模拟, 掌握了编码激励的规律和特点。通过发射调制的编码激励信号, 对接收信号进行脉冲压缩处理, 对原始二进制码 Barker 码过采样形成过采样序列, 然后用基础序列与过采样序列做线性卷积形成组合信号码元来激励超声换能器。针对实验室压电陶瓷换能器的单频特性, 采用了单位码元载有不同载频个数的 13 位 Barker 码调制信号激励换能器进行研究。从接收信号脉冲压缩仿真处理的结果看, 单位码元周期载频个数需要根据具体信号频带宽度和换能器频带宽度接近程度来选择。

本文仅进行了仿真实验, 进一步应建立实验系统平台, 激励宽频带换能器, 研究不同调制方法对激励信号及其脉冲压缩结果的影响。另外对高性能换能器的研制也是今后研究的重点, 只有解决了这一系列难点, 才能真正将编码技术应用到地震或超声探测中。

### 参考文献

- [1] Misaridis T, Jensen JA. 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): 177–190.
- [2] 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[D]. 西安: 陕西师范大学硕士论文, 2011.  
Liu B. Research on SNR improvement in ultrasonic detection based on pulse compression and bi-phase coded excitation[D]. Xian: Shanxi Normal University, Master's thesis, 2011.
- [3] Nowicki A, Secomski W, Trots I, et al. Extending penetration depth using coded ultrasonography[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2004, 52(3): 215–220.
- [4] 赵珩, 高上凯. 超声二进制编码激励血流测量的实验研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2007, 26(1):

- 12–18.
- Zhao H, Gao SK. An experimental study on ultrasound flow measurement based on binary coded excitation[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2007, 26(1): 12–18.
- [5] Ihor T, Andrzej Nowicki. Transducer bandwidth influence on the Golay encoded ultrasound echoes[C]. Proceedings of the Ultrasonics Symposium, New York, USA: IEEE, 2007: 1274–1277.
- [6] Hu CH, Zhou QF. Mismatched-filter design for biphasic-coded pulse for high frequency ultrasound imaging[C]//Proceedings of the Ultrasonics Symposium. Vancouver, Canada: IEEE, 2006: 2222–2225.
- [7] 彭旗宇, 高上凯. 医学超声成像中的编码激励技术及其应用[J]. 生物医学工程学杂志, 2005, 22(1): 175–180.
- Peng QY, Gao SK. Coded excitation and its application in medical ultrasound imaging[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2005, 22(1): 175–180.
- [8] 易正红. 相位编码雷达信号特征研究[J]. 电子对抗技术, 2002, 17(2): 7–10.
- Yi ZH. Researchs in the signal characteristics of phase-coded radar[J]. Electronic Countermeasures Technology, 2002, 17(2): 7–10.
- [9] 王威琪, 周国辉, 汪源源, 等. 关于人体信号和医学超声信号[J]. 现代临床医学生物工程学杂志, 2006, 12(15): 383–388.
- Wang WQ, Zhou GH, Wang YY, et al. About body signals and medical ultrasound signal[J]. Journal of Modern Clinical Medical Bioengineering, 2006, 12(15): 383–388.
- [10] 刘波, 郭建中. 载频调制二相编码激励的超声成像信噪比提高研究[J]. 电子学报, 2011, 39(11): 212–219.
- Liu B, Guo JZ. Research on SNR improvement in ultrasonic imaging by coded excitation with carrier modulation[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(11): 212–219.
- [11] Chiao RY, Hao XH. Coded excitation for diagnostic ultrasound: A system developer's perspective[C]//Proceedings of the Ultrasonics Symposium, Milwaukee, USA: IEEE, 2006: 437–448.
- [12] 刘凯, 高上凯. 高频超声成像中的编码激励研究[J]. 北京生物医学工程, 2007, 26(1): 31–35.
- Liu K, Gao SK. Study of coded excitation in high frequency ultrasound imaging[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2007, 26(1): 31–35.
- [13] 魏庆国, 万国金, 刘晔, 等. 编码激励医学超声成像的仿真[J]. 南昌大学学报, 2007, 31(2): 201–204.
- Wei QG, Wang GJ, Liu Y, et al. A simulation study on golay coded excitation in medical ultrasound imaging[J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2007, 31(2): 201–204.
- [14] Wang Y, Metzger K. Coded excitation with spectrum inversion (CEXSI) for ultrasound array imaging[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2003, 50(7): 805–823.
- [15] O'Donnell M, Wang Y. Coded excitation for synthetic aperture ultrasound imaging[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(2): 171–176.
- [16] Zhao H, Mo LY, 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.
- [17] 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 JH, Wan MX, Wang SP, et al. Ultrasound contrast agent harmonic imaging method based on

- frequency-modulated signal excitation[J]. Acta Acustica, 2006, 31(3): 240–246.
- [18] 张碧星, 陆铭慧. 用时间反转法在水下波导介质中实现自适应聚焦的研究[J]. 声学学报, 2002, 27(6): 541–548.  
Zhang BX, Lu MH. Study of self-focusing in underwater waveguide by time reversal method[J]. Acta Acustica, 2002, 27(6): 541–548.
- [19] 张群逸. 雷达中的相位编码信号与处理[J]. 火控雷达技术, 2005, 34: 29–32.  
Zhang QY. Phase code signal processing of radar[J]. Fire Control Radar Technology, 2005, 34: 29–32.
- [20] 马庆云, 杨辉. 激励脉冲宽度对超声发射能量的影响[J]. 矿业研究与开发, 2000, 20(5): 38–40.  
Ma QY, Yang H. The influence of drive impulse width in ultrasonic emitting energy[J]. Mining Research and Development, 2000, 20(5): 38–40.

## Simulation Study on Pulse Compression by Bi-phase Coded Excitation with Carrier Modulation

WU He-zhen<sup>✉</sup>, LIU Zheng-yi

Key Laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging,  
Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China

**Abstract:** In order to introduce the digital encoded technology to the seismic detection, the author studied coded excitation digital simulation and grasped the rules and characters of coded excitation, which is based on the basic coded excitation principle. By modulation launching of coded excitation signal, the author also did simulation research on pulse compression of received signal. Furthermore, the author processed pulse compression with 13 bit signal excitation transducer with one to five units code element (by launching of 13 bit signal excitation transducer with one to five units code element). The author did the power spectrum analyses and analyzed the influence on different excitation signal and its pulse compression result by transducer.

**Key words:** seismic detection; carrier modulation; Barker codes; pulse compression



**作者简介:** 吴何珍<sup>✉</sup> (1978—), 女, 2008 年毕业于中国科学院地质与地球物理研究所, 获博士学位, 现为中国地震局地球物理研究所副研究员, 主要从事应用地震学方面的研究, Tel: 010-68729304, E-mail: wuhezhen.cea@gmail.com。