

# 脉冲编码可控震源信号设计

王忠仁, 高健, 孙锋

(吉林大学仪器科学与电气工程学院地球信息探测仪器教育部重点实验室, 长春 130026)

**摘要** 通过脉冲编码技术使震源向地下激发出可人为控制的变步长的脉冲序列, 采用解码技术将这种连续多次小能量激发情形的原始地震记录转换为等价的单次大能量激发的地震记录. 文中通过数值模拟技术对脉冲编码震源信号地震响应的规律和特点进行了研究. 模拟结果表明, 脉冲编码信号冲击间隔的增量是压制相关噪声的关键因素, 调整冲击间隔的增量对相关噪声的影响要比增加冲击次数对相关噪声的影响灵敏得多, 而重复的冲击间隔对压制相关噪声不起任何作用.

**关键词** 脉冲编码, 可控震源, 伪随机序列, 相关噪声, 数值模拟

**中图分类号** P631      **文献标识码** A      **文章编号** 1004-2903(2008)06-1931-05

## Signal design for controllable seismic source by pulse coding

WANG Zhong-ren, GAO Jian, SUN Feng

(Key Lab of Geo-Exploration and Instrumentation of Ministry of Education, College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

**Abstract** With the pulse coding technique, a series of pulses, which are produced by a controllable impact source and have the variable time intervals, are introduced into the ground. The seismic recording from a series of many low-power impact pulses can be transformed into a recording that is equivalent to the one from high-power impact pulse by using decoding techniques. The characteristics of seismic response to pulse coding signal are investigated by numerical simulating. The results show that the increment in the value of pulse interval between two neighboring impacts in a coded signal is a key factor for suppressing correlation noise. Changing the increment of impact interval is more sensitive to suppressing correlation noise than increasing the times of impacting. But repeated impact intervals do not have any effect on weakening the correlation noise.

**Keywords** pulse coding, controllable seismic source, pseudo-random sequence, correlation noise, numerical simulating

## 0 引言

### 0 引言

在地震勘探中, 根据勘探目标的形态和深度的不同采用有效的人工激发方式是获取高质量采集数据的一个至关重要的环节. 在以往的陆地油气资源地震勘探中, 通常都是采用炸药作为人工震源. 由于炸药震源对环境的破坏比较严重, 而且不可以重复利用, 近年来基于连续扫频的可控震源(Vibroseis)得到了广泛应用<sup>[1]</sup>. 作为海洋地震勘探的一种主要震源——气枪震源尤其是大容量气枪震源近来在深

部地球构造探测领域成为一个研究热点<sup>[2~4]</sup>. “地震雷达<sup>[5,6]</sup>”和脉冲编码震源<sup>[7]</sup>的理论探讨和试验研究工作也已在我国逐步展开.

在浅层地震勘探领域, Barbier 等<sup>[8~10]</sup>提出了 Mini-SOSIE 方法, 该方法的主要特点是以相对轻便的冲击夯作为震源, 发出一个很长的随机编码脉冲序列, 通过相关解码运算得到与常规单炮记录近似等价的解码地震记录. 该项技术由于具有较高的分辨率在浅层地震勘探中具有明显的优势<sup>[11]</sup>.

Mini-SOSIE 方法在应用过程中有时也会遇到困难. 首先, 要想得到冲击速率的随机分布, 需要几

百次甚至上千次的冲击次数,接收时间通常可达几分钟,常规的地震记录仪器无法满足要求,需要专门的地震记录仪器才能实现,而且由于冲击时间很长也降低了勘探施工效率,增加了施工成本.其次,尽管冲击次数很多,由于冲击夯的固有限制难以得到一个真正意义下的随机序列,因此,严重的相关噪声会对地震记录的信噪比产生较大影响.

Park 与 Miller 等(1996)<sup>[12]</sup>提出了一种扫描冲击地震技术(SIST),该技术将可控震源线性(Chirp)扫描技术<sup>[13~15]</sup>与 Mini-SOSIE 技术结合起来,形成的冲击序列随机性好,冲击次数可以显著减少.本文利用数值模拟技术研究这种线性脉冲编码技术的规律和特点,为新型高精度脉冲编码轻便可控震源的研制提供方法与技术支持.

## 1 线性脉冲编码地震记录原理

设  $s(t)$  为脉冲震源输入到地下的单个地震子波,  $r(t)$  为地层反射序列,则理想条件下一个反射地震记录  $y(t)$  可表为

$$y(t) = s(t) * r(t), \quad (1)$$

其中  $*$  号表示卷积运算.

设  $q(t)$  是一个伪随机序列,则震源的脉冲编码信号可表为

$$p(t) = q(t) * s(t), \quad (2)$$

用编码信号  $p(t)$  代替(1)式中的  $s(t)$  得到输出

$$z(t) = q(t) * s(t) * r(t). \quad (3)$$

用  $q(t)$  对(3)式做互相关运算可得到解码地震记录

$$\begin{aligned} y_p(t) &= q(t) \otimes (q(t) * s(t) * r(t)) \\ &= \mathbf{A}_{CF}\{q(t)\} * s(t) * r(t). \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $\otimes$  号表示互相关运算,  $\mathbf{A}_{CF}$  表示自相关函数.

如果

$$\mathbf{A}_{CF}\{q(t)\} = k\delta(t),$$

则有

$$y_p(t) = ks(t) * r(t). \quad (5)$$

此时,解码地震记录  $y_p(t)$  与理想反射地震记录  $y(t)$  之间只差一个常数增益因子  $k$ . 但是由二元  $\{0,1\}$  编码得到的随机序列的自相关函数都不可能是一个理想脉冲函数  $k\delta(t)$ , 因此设计自相关函数与理想脉冲接近的伪随机序列是减弱相关噪声的一个关键问题. Park 与 Miller 等给出的线性编码方案是一种比较有效的编码技术<sup>[12]</sup>.

设  $h_1$  为第 1 次激发与第 2 次激发之间的初始时间间隔, 给定时间间隔增量  $d$  和激发次数  $N$ , 第  $k$

次激发与第  $k+1$  次激发之间的时间间隔为

$$h_k = h_1 + (k-1)d, \quad (k=1, 2, \dots, N-1), \quad (6)$$

上式表明,按顺序激发的子波序列之间的时间间隔是按线性规律变化的.

给定地震子波  $s(t)$ , 并按(6)式给出的时间间隔  $h_k$  进行顺序激发, 就形成了一个线性脉冲编码震源信号  $p(t)$ . 图 1 给出了以主频为 90Hz 的雷克子波作为地震子波  $s(t)$ ,  $h_1 = 0.05\text{ s}$ ,  $d = 0.008\text{ s}$ ,  $N = 10$  情形的线性脉冲编码震源信号.

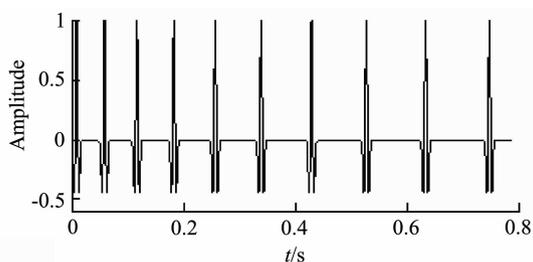


图 1 线性脉冲编码震源信号

Fig. 1 Linear pulse coding signal for a source

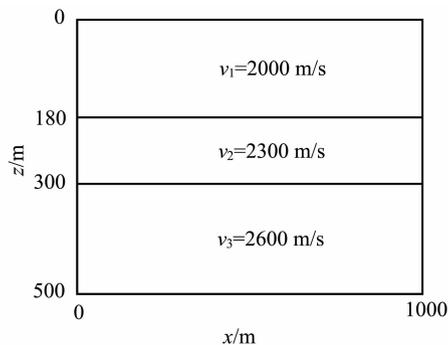


图 2 水平层状介质模型

Fig. 2 Model of horizontal layers

## 2 脉冲编码地震技术的数值模拟

我们构造了图 2 所示的地层模型,最深目的层为  $z = 300\text{ m}$  处的界面. 采用有限差分法对线性编码震源信号的解码地震响应进行了数值模拟. 模拟中最小炮检距为 40 m, 道间距为 12 m, 地震道数为 24 道, 震源子波采用主频 90Hz 的雷克子波, 地震记录的时间采样步长为  $\Delta t = 0.0002\text{ s}$ , 单炮接收时间为  $T_0 = 0.42\text{ s}$ , 编码情形开始两炮之间的时间间隔为  $h_1 = 0.075\text{ s}$ , 最长接收时间限制在  $T = 20\text{ s}$  之内.

图 3(a, b) 是  $d = 0.004\text{ s}$ , 分别取  $N = 36$  ( $T = 5.5\text{ s}$ ) 和  $N = 83$  ( $T = 20\text{ s}$ ) 情形的编码震源信号的解码地震响应剖面.

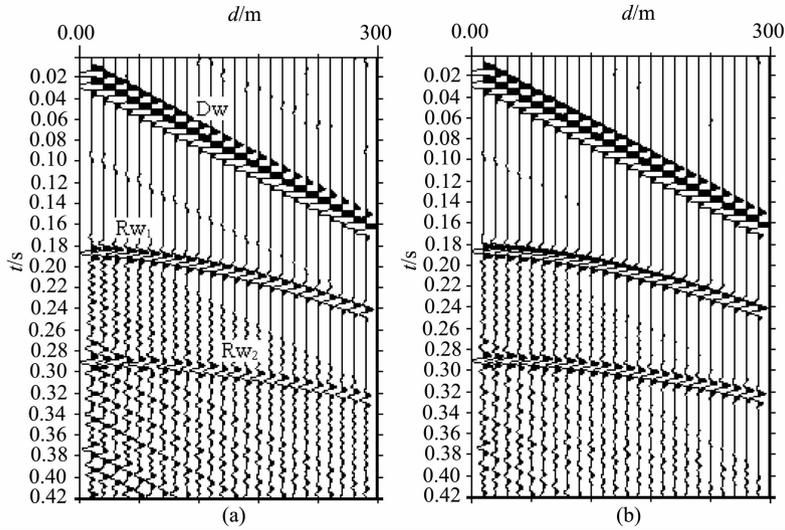


图 3  $d = 0.004$  s 情形的解码地震剖面

(a)  $N = 36$ ; (b)  $N = 83$

Fig. 3 Decoded seismic sections for  $d = 0.004$  s

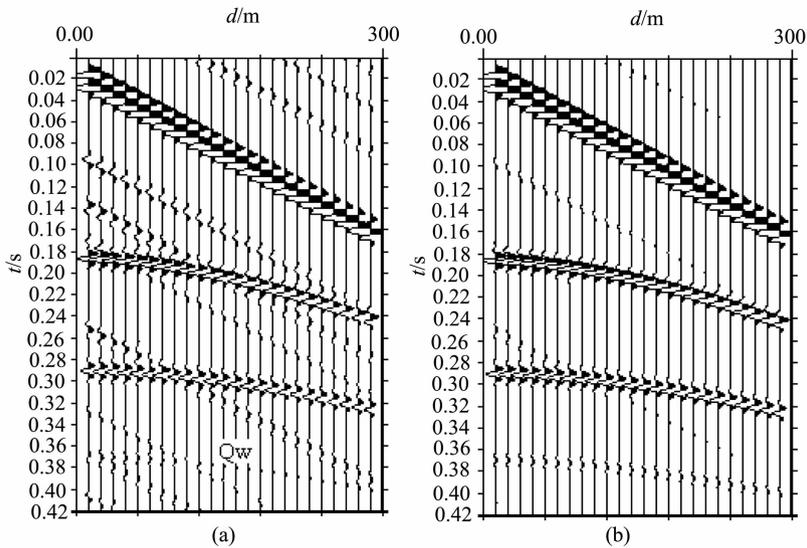


图 4  $d = 0.0012$  s 情形的解码地震剖面

(a)  $N = 36$ ; (b)  $N = 130$

Fig. 4 Decoded seismic sections for  $d = 0.0012$  s

由图 3(a)可见,当  $d = 0.004$  s,  $N = 36$  ( $T = 5.5$  s)时,直达波(Dw)和来自  $z = 180$  m,  $z = 300$  m 两个界面的反射波( $Rw_1$  和  $Rw_2$ )都有清晰可见的同相轴,0.18 s 以上有两个较弱的与直达波平行的斜线状相关噪声干扰,0.18 s 以下有着较强的面状分布的相关噪声干扰.由图 3(b)可见,随着炮数的增加,这种相关噪声的干扰有所减弱,但在  $T = 20$  s 范围内,这种减弱的效果并不显著.

由图 4(a)可见,当  $d = 0.0012$  s 时,  $N = 36$  ( $T = 4$  s)的情况就已不再出现图 3 中那样的面状相关噪声,而且 0.37 s 附近的微弱同相轴(与自由表面有关的二次波(Qw))可以分辨.但是斜线状的相关噪声能量要强于图 3(a)的情形.不过,随着炮数的增加,这种干扰逐步减弱,到 130 炮( $T = 20$  s)(如图 4(b))已经达到了很好的抑制相关噪声的效果.

图 4(a, b)是  $d = 0.0012$  s, 分别取  $N = 36$  ( $T = 4$  s)和  $N = 130$  ( $T = 20$  s)情形的编码震源信号的解码地震响应剖面.

图 4(a, b)是  $d = 0.0012$  s, 分别取  $N = 36$  ( $T = 4$  s)和  $N = 130$  ( $T = 20$  s)情形的编码震源信号的解码地震响应剖面.

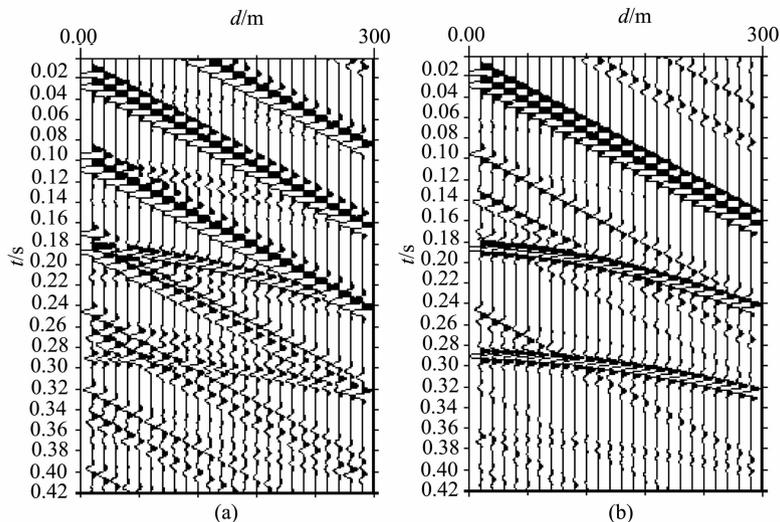
图5  $d = 0.0002$  s 情形的解码地震剖面(a)  $N = 36$ ; (b)  $N = 205$ Fig. 5 Decoded seismic sections for  $d = 0.0002$  s

图5(a, b)是  $d = 0.0002$  s, 分别取  $N = 36$  ( $T = 4$  s)和  $N = 205$  ( $T = 20$  s)情形的编码震源信号的解码地震响应剖面。

由图5(a)可见,当  $d = 0.0002$  s时,剖面中除了能量很强的斜线状相关噪声之外,还出现了与反射同相轴形状相似的双曲线形状的相关噪声(鬼波),随着炮数的增加,有效波能量逐渐增强,相关噪声能量逐渐减弱,但到20 s时(图5(b)),斜线状相关噪声能量仍然很强,容易造成错误解释的鬼波依然可见。

对比图3、图4和图5可以看出,当增量值  $d$  偏大时(如图3),剖面下部的面状相关噪声很强,不便于识别剖面下部的有效同相轴,这也意味着不便于获取深部的反射信息。当  $d$  值偏小时(如图5),不但斜线状的相关噪声能量强,而且剖面中还含有双曲线形状的鬼波,给正确区分真实反射波还是虚假的鬼波带来了困难。选择适当的增量值  $d$  对压制相关噪声是至关重要的。

通过模拟计算,我们还获得了如下几点结论:当增量值  $d$  为负值(初值  $h_1$  先取到最大,然后冲击时间间隔逐渐减小)时,其模拟计算结果与增量值  $d$  为正值(初值  $h_1$  先取到最小,然后冲击时间间隔逐渐增大)的情形完全一样;当增量值  $d = 0$  时(理论上的等间隔冲击),不论激发多少次,其解码结果都没有任何实际意义;当一个激发序列中有部分重复的冲击间隔时,其解码的结果与去掉重复部分所得到的解码结果在消除相关噪声方面没有差异,就是说

间隔相同的重复冲击对压制相关噪声不起任何作用。限于篇幅,这些方面的图件从略。

### 3 结论

脉冲编码信号冲击间隔的增量对压制相关噪声的效果起着决定性的作用。当冲击间隔的增量值较大时,对于提高解码地震剖面浅部反射波的信噪比有利,而且与直达波平行的斜线状相关干扰也比较弱。但是对于一定深度以下的面状分布的相关噪声压制效果较差。当冲击间隔的增量值逐渐减小时,解码地震剖面中面状相关噪声的分布范围向下逐渐减小,剖面中出现时间较晚的微弱同相轴可以逐渐显露出来。但是当冲击间隔的增量值过小时,解码地震剖面中不但与直达波平行的斜线状干扰的能量很强,而且还会出现与反射波形状相似的双曲线状的相关干扰(鬼波)。当冲击间隔的增量值固定后,依靠增加炮数的方法可以使整个剖面的信噪比有所提高,但这种提高的效果与改变冲击间隔的增量值相比要迟钝得多。采用冲击间隔逐渐减小的脉冲编码方法与冲击间隔逐渐增加的方法所得到的解码效果是相同的。重复的冲击间隔对压制相关噪声没有任何作用。

### 参 考 文 献 (References):

- [1] 陶知非. 改善可控震源高频信号输出品质的探讨[J]. 物探装备, 2008, 18(2): 71~77.  
Tao Z F. Study on improving quality of high2frequency output

- signal in vibroseis[J]. EGP, 2008, 18(2): 71~77.
- [2] 罗桂纯,王宝善,葛洪魁,等. 气枪震源在地球深部结构探测中的应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 400~407.  
Luo G C, Wang B S, Ge Hong-kui, *et al.* Progress in earth's deep structures exploration by air gun source [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006, 21(2): 400~407.
- [3] 林建民,王宝善,葛洪魁,等. 大容量气枪震源特征及地震波传播的震相分析[J]. 地球物理学报, 2008, 51(1): 206~212.  
Lin J M, Wang B S, Ge H K, *et al.* Study on large volume airgun source characteristics and seismic phase analysis [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2008, 51(1): 206~212.
- [4] 赵明辉,丘学林,夏少红,等. 大容量气枪震源及其波形特征[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 558~565.  
Zhao M H, Qiu X L, Xia S H, *et al.* Large volume air2gun sources and its seismic waveform characters [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2008, 51(2): 558~565.
- [5] 陈颢,朱日祥. 设立“地下明灯研究计划”的建议[J]. 地球科学进展, 2005, 20(5): 485~489.  
Chen Y, Zhu R X. Proposed project of “Underground Bright Lump” [J]. Adv. Earth Sci. (in Chinese), 2005, 20(5): 485~489.
- [6] 陈颢,张尉,陈汉林等. 地震雷达[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 1~5.  
Chen Y, Zhang W, Chen H L, *et al.* Seismic Radar [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006, 21(1): 1~5.
- [7] 葛洪魁,林建民,王宝善,等. 编码震源提高地震探测能力的野外实验研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(3): 864~870.  
Ge H K, Lin J M, Wang B S, *et al.* A field experiment study of improving the seismic detectability with coded source [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(3): 864~870.
- [8] Barbier M G, Viallix J R. SOSIE: A new tool for marine seismology[J]. Geophysics, 1973, 22(4): 673~683.
- [9] Barbier M G, Viallix J R. Pulse coding in seismic prospecting — SOSIE and SEISCODE [J]. Geophysical Prospecting, 1974, 22: 153~175.
- [10] Barbier M G, Bondon P, Mellinger R, Viallix J R. Mini-SOSIE for land seismology [J]. Geophysical Prospecting, 1976, 24: 518~527.
- [11] 常旭,李林新,刘伊克,等. 北京断陷黄庄—高丽营断层伪随机可控震源地震剖面[J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1503~1510.  
Chang X, Li L X, Liu Y K, *et al.* Seismic profile of Huang-zhuang—Gaoliying fault in Beijing by Mini2sodie method [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2008, 51(5): 1503~1510.
- [12] Park C B, Miller R D, Steeples D W and Black R A. Swept impact seismic technique (SIST) [J]. Geophysics, 1996, 61(6): 1789~1803.
- [13] Chapman W L, Brown G L, Fair D W. The Vibroseis system: A high-frequency tool [J]. Geophysics, 1981, 46(12): 1657~1666.
- [14] Chen Z B, Lin J. Design for vibrator field experiment based on vibrator-Earth system [J]. Journal of Geoscientific Research in Northeast Asia, 2000, 3(1): 107~113.
- [15] 王忠仁,林君,冯声涯. 地震勘探中相控阵震源的方向特性研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1191~1197.  
Wang Z R, Lin J, Feng S Y. Directivity of phase array vibrators in seismic exploration [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(4): 1191~1197.