

文章编号: 1001-0920(2004)12-1345-04

## 相控震源与组合震源地震信号检测结果对比

姜 弢<sup>1,2</sup>, 林 君<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 国土资源部现代地球物理仪器研究开放实验室, 吉林 长春 130026;  
2. 吉林大学 计算机科学与技术学院, 吉林 长春 130012)

**摘 要:** 为提高可控震源地震信号的信噪比, 将雷达系统的相控阵技术应用于可控震源地震, 通过控制相邻震源的相位差恒定, 使地震波能量集中, 产生定向地震波束, 加强有用信号的强度, 从而提高了地震信号的信噪比. 在给定条件下, 与单震源地震和组合震源地震相比, 相控地震的信噪比最高. 因此, 将相控技术应用于可控震源是可行的.

**关键词:** 可控震源; 相控阵; 组合地震; 检测; 相关

**中图分类号:** TH763

**文献标识码:** A

## Comparison of the detected seismic signals between phased array and combination vibroseis

J I A N G T a o<sup>1,2</sup>, L I N J u n<sup>1</sup>

(1. Country Resource Ministry Modern Geophysics Instrument Open Lab, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China  
Correspondent: J I A N G T a o, E-mail: ccpt\_jiangtao@sina.com)

**Abstract:** In order to improve SNR of seismic signal for controlled vibroseis in seismic exploration, a set of phased array vibroseis is developed for generating directional seismic wave by controlling differences of phases between neighboring vibroseis, and a special seismic signal detection method for phased array vibroseis is proposed. The phased array seismic signal detection result is given and compared with single and combination vibroseis under the same experience condition. It concluded that using phased array technology in vibroseis seism is feasible and the seismic signals from phased array vibroseis are better than combination vibroseis seism.

**Key words:** vibroseis; phased array; combination seism; detection; correlation

### 1 引 言

可控震源<sup>[1~3]</sup>地震, 是指震源以地震波形式向地下发射 chirp 信号, 地震波在不同构造的地层交界面或地下目标体表面发生反射, 反射波通过地面的检波器进入地震仪. 地震仪接收到的信号仍为调频信号, 可通过相关技术转变为带有目标深度信息的脉冲信号, 再经地震数据处理即可实现地下目标成像.

传统的可控震源地震方法分为单个震源地震和多个震源组合地震两种方法, 其信噪比较低. 本文借鉴雷达系统的相控技术, 提出一种新的相控震源地震方法, 即通过形成定向地震波<sup>[4]</sup>来提高接收信号的信噪比, 目前国内尚未见过这方面研究. 本文重点对比了采用单个、组合及相控震源 3 种地震方式勘探得到的地下目标检测结果, 论证了相控系统的可行性和优越性.

收稿日期: 2004-02-02; 修回日期: 2004-06-14

基金项目: 国家 863 计划基金资助项目 (2002AA 135240).

作者简介: 姜弢 (1969—), 女, 吉林长春人, 讲师, 博士生, 从事智能仪器、计算机控制系统的研究; 林君 (1954—), 男, 吉林通化人, 教授, 博士生导师, 从事弱信号检测、智能仪器等研究.

## 2 单个、组合及相控震源系统对比实验条件

为对比分析单个、组合及相控阵地震系统的实验数据和结果, 必须确定相同的实验条件

### 2.1 可控震源扫描控制信号

单个可控震源的控制信号采用线性变频扫描 chirp 信号. 实验中, 选取起始扫描频率  $f_1 = 10$  Hz, 终止扫描频率  $f_2 = 210$  Hz, 中心频率  $f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2} = 110$  Hz, 扫描时间  $T = 4$  s, 扫描幅度  $A = 1$ . 设  $t$  为时间变量, 则扫描信号为<sup>[5]</sup>

$$s(t) = A \cos 2\pi \left( f_1 + \frac{f_2 - f_1}{2T} t \right) t = \cos 2\pi (10 + 25t) t \quad (1)$$

### 2.2 地震仪参数设置

地震仪采样频率为 2kHz

### 2.3 地层信息

设地震波波速  $v = 800$  m/s. 震源发出的地震波在大地传播过程中衰减, 由于地下介质不同, 衰减规律各异, 理论计算时通常选取指数衰减模型. 在不考虑噪声影响时, 地震波为<sup>[6]</sup>

$$r(t) = s(t) \cdot e^{-bt}, \quad (2)$$

其中:  $b = 0.0345$ ,  $f = f_1 + \frac{f_2 - f_1}{T} t$  为地震波瞬时频率

假设地震波在传播过程中经过 3 个目标层, 产生 3 次反射, 反射波信号是震源信号在时间上的延迟, 分别为

$$r_1(t) = r(t - t_1),$$

$$r_2(t) = r(t - t_2),$$

$$r_3(t) = r(t - t_3).$$

这里  $t_1, t_2, t_3$  代表各反射信号到达检波器的时刻, 不妨设  $t_1 = 0.125$  s,  $t_2 = 0.25$  s,  $t_3 = 0.5$  s, 根据地震仪采样率, 分别对应第 256, 512, 1024 个采样点

### 2.4 检波器接收的地震波方向

震源发出的地震波在地下半空间  $180^\circ$  范围内发散传播, 一旦检波器位置确定后, 只能接收某个方向的地震波. 这里设检波器接收的地震波方向与检波器阵列成  $\varphi = 75^\circ$ ; 并设单个震源在  $\varphi$  方向形成的地震波场强为  $E_0$ .

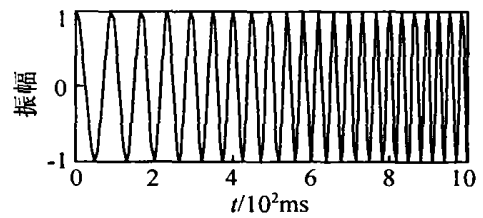
### 2.5 噪声条件

设野外噪声为白噪声  $r_N(t)$ , 噪声水平与单个震源信号相当, 即振幅  $A_N = A = 1$ .

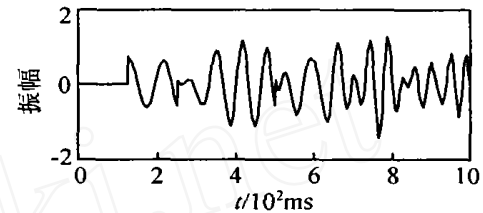
### 2.6 震源数量 $n$ 和间距 $d$

野外工作中, 组合震源及相控震源系统中震源数目和间距可变, 本实验中设定  $n = 4$ ,  $d = 4$  m.

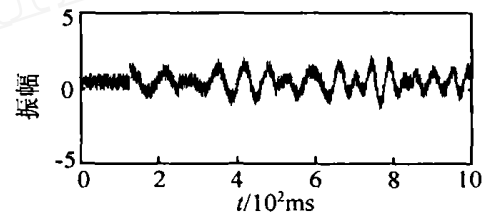
## 3 单个可控震源地震信号检测<sup>[7,8]</sup> 分析



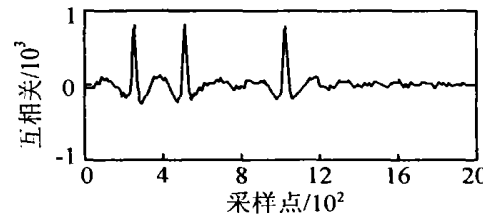
(a) 单震源扫描控制信号(相关参考信号) $s(t)$



(b) 理想未受噪声干扰的反射信号  $r_0(t)$



(c) 受噪声干扰的反射信号  $r_s(t)$



(d) 单震源地震信号检测结果, 即  $s(t)$  与  $r_s(t)$  相关

图 1 单个震源地震检测结果仿真曲线

单个可控震源控制信号为  $s(t)$ , 如图 1(a) 所示. 传播过程中受大地衰减可视为  $r(t)$ .  $r(t)$  经 3 个目标层反射, 反射信号分别为  $r_1(t), r_2(t), r_3(t)$ . 震源发出震动信号的同时, 采用插入地表的检波器阵列接收反射信号.

不考虑噪声时, 检波器的理想接收信号为

$$r_0(t) = r_1(t) + r_2(t) + r_3(t), \quad (3)$$

如图 1(b) 所示, 包含 3 个目标层信息.

含噪声的实际接收信号为

$$r_s(t) = r_1(t) + r_2(t) + r_3(t) + r_N(t), \quad (4)$$

如图 1(c) 所示, 为一个受干扰的调频信号.

由于  $r_s(t)$  是一个受噪声干扰的 3 个调频信号的混合, 无法体现带有目标层信息的脉冲信号, 即地震信号. 要从  $r_s(t)$  中提取目标信息, 一般采用相关检测方法<sup>[9]</sup>: 即利用参考信号与接收信号在波形上的相似性, 实现强随机噪声淹没下的弱信号检测. 相

关检测的关键在于参考信号的选取。单可控震源地震中,参考信号可选用  $s(t)$  或  $r(t)$ 。由相关理论知,  $r(t)$  是最好的,但实际地震勘探不易取得,故通常选用  $s(t)$ 。单个震源地震的信号检测结果为  $s(t)$  与  $r_s(t)$  的互相关,如图 1(d) 所示

图 1(a) ~ (c) 均截取了 1 000 m s 的信号,图 1(d) 截取了 2 000 个采样点

由实验条件,  $A_N = A$ , 此时信噪比为 0 dB.

#### 4 组合地震系统的信号检测分析

单个震源输出力有限,为增加探测深度和提高信噪比,人们自然想到采用多个震源同时震动即组合地震这一方法

设组合地震系统中各震源等间距共线均匀排列,且与检波器阵列共线。各震源采用相同控制信号同时震动,借鉴雷达系统的阵列天线原理,用  $\varphi$  表示任一地下方向,则地震波方向性可用归一化因子表示为<sup>[10]</sup>

$$F_c(\varphi) = \frac{\sin \frac{nk d \cos \varphi}{2}}{n \sin \frac{k d \cos \varphi}{2}} \quad (5)$$

其中

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{v} \quad (6)$$

根据式(5)做极坐标图,该图称为组合地震地震波方向图。由式(5)和(6)可知,  $F_c(\varphi)$  与  $f$  有关。图 2 为  $f = f_0$  时的组合地震地震波方向图。从图中看出,地震波最强的方向,在垂直于震源阵列轴线方向:  $90^\circ$  方向

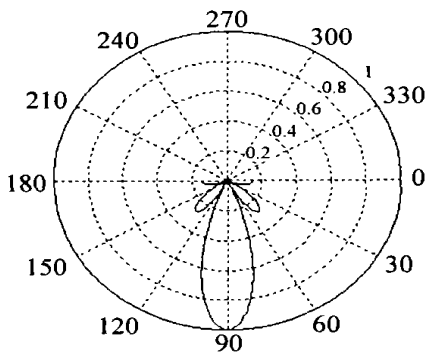


图 2 组合地震地震波方向图

设组合地震主波束方向上场强为  $E_{\max}$ , 当各震源位置较近时,  $E_{\max} = nE_0$ <sup>[10]</sup>。在  $\varphi$  方向上,组合震源产生的地震波总场强为<sup>[10]</sup>

$$|E_c(\varphi)| = |E_{\max} F_c(\varphi)| =$$

$$\left| E_{\max} \frac{\sin \frac{nk d \cos \varphi}{2}}{n \sin \frac{k d \cos \varphi}{2}} \right| \quad (7)$$

设  $A_c = |E_c(\varphi)| / |E_0|$ , 根据式(6)和(7),当  $f = f_0$  时,  $A_c = 2.26$

由上面推导,  $\varphi$  方向上可用一个等效震源代表组合震源,等效震源的控制信号为

$$s_c(t) = A_c s(t) = A_c \cos 2\pi \left( f_1 + \frac{f_2 - f_1}{2T} t \right) t$$

理想接收信号为

$$r_{oc}(t) = A_c (r_1(t) + r_2(t) + r_3(t));$$

实际接收信号为

$$r_c(t) = A_c (r_1(t) + r_2(t) + r_3(t)) + r_N(t);$$

扫描参考信号仍选  $s(t)$ ; 组合地震的信号检测结果为  $s(t)$  与  $r_c(t)$  的互相关,如图 3 所示

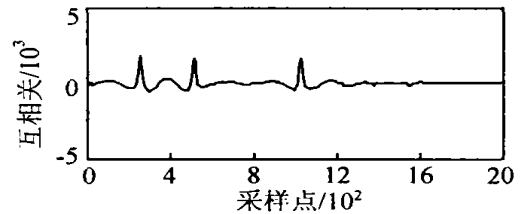


图 3 多个震源组合地震检测结果仿真曲线

本实验条件下,  $A_c = 2.26$ , 因此组合地震信噪比为 7.08 dB. 实际组合地震中,震源间距变化,扫描控制信号频率变化以及检波器接收地震波方向的变化,都会改变信噪比

组合地震的缺点是检波器接收的地震波方向不是主波束方向,因而震动能量不能有效集中。改进方法就是采用相控系统,控制地震波主波束方向对准检波器

#### 5 相控阵系统的信号检测分析

##### 5.1 可控震源相控系统模型

由雷达相控理论,当  $n$  个震源等间距共线排列,各相邻震源信号保持恒定相差<sup>[10]</sup>

$$\beta = -kd \cos \varphi = -\frac{2\pi f d \cos \varphi}{v} \quad (8)$$

时,构成主波束方向为  $\varphi$  的相控系统,且该相控系统归一化方向因子为

$$F_p(\varphi) = \frac{\sin \left[ \frac{nk d}{2} (\cos \varphi_0 - \cos \varphi) \right]}{n \sin \left[ \frac{k d}{2} (\cos \varphi_0 - \cos \varphi) \right]} \quad (9)$$

图 4 为  $f = f_0$  时,由式(9)得到的相控阵地震波方向图

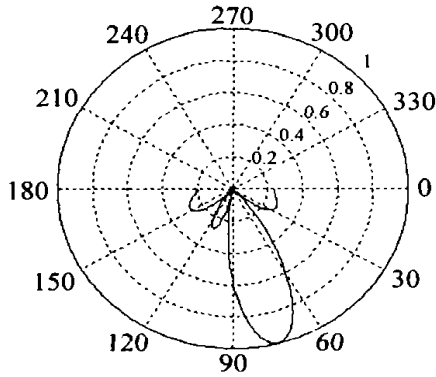


图 4 波束方向为 75° 的四可控震源相控阵地震波方向图

5.2 相控阵震源地震系统各震源控制信号选取

各震源信号仍为 chirp 信号, 只是增加了一个初始相位. 相控系统各震源控制信号分别为

$$\begin{aligned}
 s_1(t) &= A \cos 2\pi(f_1 + \frac{f_2 - f_1}{2T}t)t, \\
 s_2(t) &= A \cos[\beta + 2\pi(f_1 + \frac{f_2 - f_1}{2T}t)t], \\
 s_3(t) &= A \cos[2\beta + 2\pi(f_1 + \frac{f_2 - f_1}{2T}t)t], \\
 s_4(t) &= A \cos[3\beta + 2\pi(f_1 + \frac{f_2 - f_1}{2T}t)t] \quad (10)
 \end{aligned}$$

5.3 相关检测时参考信号的选取

式(8)中当  $f = f_1$  时, 取对应的  $\beta$  值为  $\beta_0$ . 由相控阵理论<sup>[10, 11]</sup>, 主波束方向  $\varphi$  的地震信号为初始相位  $\beta_p = \frac{(n-1)\beta_0}{2}$  的 chirp 信号, 因此在该方向上, 相控阵源系统可用一个等效震源代替. 设等效震源信号为  $u(t)$ , 则有

$$u(t) = A_p \cos[\frac{n-1}{2}\beta_0 + 2\pi(f_1 + \frac{f_2 - f_1}{2T}t)t],$$

其中  $A_p = nA$ . 由相关检测原理, 相关参考信号应选择与接收信号相似的波形, 而与信号幅度无关, 因此在相控系统中, 相关参考信号可选择为

$$\begin{aligned}
 p(t) &= u(t)/n = \\
 &A \cos[\frac{n-1}{2}\beta_0 + 2\pi(f_1 + \frac{f_2 - f_1}{2T}t)t];
 \end{aligned}$$

理想接收信号  $r_{op}(t)$  为  $u(t)$  经 3 个目标反射后的叠加, 则有

$$r_{op}(t) = A_p (r_1(t) + r_2(t) + r_3(t));$$

含噪声的实际接收信号为

$$r_{sp}(t) = r_{op}(t) + r_n(t);$$

相控阵相关检测结果为  $p(t)$  与  $r_{sp}(t)$  互相关, 如图 5 所示. 由相关结果可看出, 3 个目标层的时延分别在 256, 512, 1024 采样点处被正确检测出来. 此时

$A_p/A \quad n = 4$ , 接收信号的信噪比为 12.04 dB.

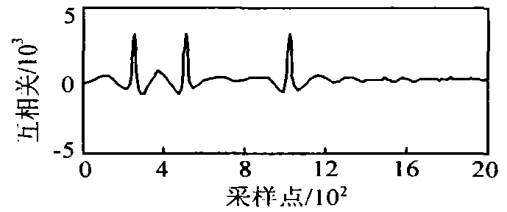


图 5 多个震源相控地震检测结果仿真曲线

6 结 论

由仿真结果可知, 相控地震系统得到的数据经相关处理后, 其信噪比明显好于组合地震和单个震源地震的情况. 此外, 根据野外实际地震勘探经验, 组合地震的台数若超过 3, 4 台<sup>[9]</sup>, 效果反而更差; 而相控地震系统不受数量限制. 因此, 相控阵技术应用于可控震源地震不仅是可行的, 而且比单个及组合震源地震效果更好.

参考文献(References):

- [1] 林君, 陈祖斌. 可控震源-大地耦合模型研究[J]. 中国学术期刊文摘, 1999, 5(6): 811-812  
(Lin J, Chen Z B. Study on modal on coupling for vibroseis with ground[J]. *Academic Periodical Abstract of China*, 1999, 5(6): 811-812.)
- [2] 张子山, 林君, 陈祖斌, 等. 轻便高频可控震源的计算机测控系统[J]. 计算机自动测量与控制, 2000, 8(4): 10-14  
(Zhang Z S, Lin J, Chen Z B, et al. Industrial PC based measurement and control system in portable high-frequency vibrator[J]. *Computer Automation and Control*, 2000, 8(4): 10-14.)
- [3] Chen Z B, Lin J. Design for vibrator field experiment based on vibrator-earth system[J]. *J of Geoscientific Research in Northeast Asia*, 2000, 3(1): 107-113
- [4] Arnold M E. Beam forming with vibrator arrays[J]. *Geophysics*, 1977, 42(7): 1321-1338
- [5] Nigel A Anstey. *Vibroseis* [M]. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1991. 149.
- [6] Nigel A Anstey. *Vibroseis* [M]. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1991. 156-161.
- [7] 蒋忠进, 林君, 陈祖斌, 等. 小波包在可控震源地震信号时延估计中的应用[J]. 吉林大学学报, 2003, 21(2): 105-109  
(Jiang Z J, Lin J, Chen Z B, et al. Application of wavelet packet in time-delay estimation of signal of vibroseis exploration[J]. *J of Jilin University*, 2003, 21(2): 105-109.)

(下转第 1353 页)

系统状态的可观性

#### 4 说明示例

本文主要讨论系统控制输入对可观性的影响, 这里给出的示例用于说明控制输入是如何影响线性混合系统状态可观性的

假定混合系统由两个二维系统组成, 切换分别为

$$\Sigma_1: \begin{cases} x(k+1) = \begin{bmatrix} 0.9 & 0 \\ 0 & 0.9 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(k), \\ y(k) = [1 \ 0]x(k), x_1(k) < 0; \end{cases}$$

$$\Sigma_2: \begin{cases} x(k+1) = \begin{bmatrix} 0.8 & 0 \\ 0 & 0.7 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(k), \\ y(k) = [0 \ 1]x(k), x_1(k) < 0 \end{cases}$$

因为  $\text{obs}_{S_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0.9 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $\text{obs}_{S_2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0.7 \end{bmatrix}$ , 所以  $\text{rank}(\text{obs}_{S_1}) = \text{rank}(\text{obs}_{S_2}) = 1$ , 即每个子系统均为不可观; 而  $\text{rank}([\text{obs}_{S_1} \ \text{obs}_{S_2}]) = 2$ ,  $\text{rank}(\text{obs}_{S_1} - \text{obs}_{S_2}) = 2$  因此若出现离散状态切换, 则可唯一确定系统初始状态及初次切换时间 但应注意到, 若不存在控制输入, 即  $u(k) = 0$ ; 则任意初始状态都要单调地收敛到原点, 且不会越过自治迁移平面  $x_1 = 0$ , 即不会发生离散状态迁移 只有存在充分激励控制输入, 离散状态迁移才会发生, 即连续状态越过  $x_1 = 0$  事实上, 满足该条件的输入是可以确定的, 如取  $u(k) = \sin(\omega k)$ ,  $\omega = 0.05$  即可

#### 5 结 论

本文讨论控制输入对线性混合系统状态可观性的影响 这类混合系统在发生离散状态切换之前, 不能完全确定系统的初始混合状态, 即混合系统状态不可观 如果存在离散状态变化, 使得系统中不同的动态特性在输出中充分地得到表现, 则有可能使这样的混合系统的状态变为可观的 混合系统的控制

输入(无论是离散控制输入, 还是连续控制输入)会影响混合系统状态, 有可能使系统的离散状态发生变化, 称能引起这样变化的控制输入为充分激励的 在充分激励的控制输入作用下, 混合系统必定要经历离散状态的切换 本文通过研究确定混合系统状态的条件, 以秩检验规则给出了这类混合系统状态的可观条件

#### 参考文献(References):

- [1] Ezzine J, Haddad A H. Controllability and observability of hybrid systems [J] *Int J of Control*, 1989, 49 (6): 2045-2055
- [2] Li Z, Soh C B. Robust controllability and observability of impulsive interval hybrid dynamic systems [J] *Int J of System Science*, 1999, 30(10): 1109-1122
- [3] Soh C B. Controllability and observability of periodic hybrid interval systems [J] *Int J of System Science*, 2000, 31 (12): 1563-1571
- [4] Bemporad A, Ferrari G, Morari M. Observability and controllability of piecewise affine and hybrid systems [J] *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45 (10): 1864-1876
- [5] Vidal R, Chiuso A, Soatto S. Observability and identifiability of jump linear systems [A] *Proc of IEEE Conf on Decision and Control* [C] Las Vegas, 2002 3614-3619
- [6] Vidal R, Chiuso A, Soatto S, et al. Observability of linear hybrid systems [A] *Hybrid Systems-Computation and Control, 6th Int Workshop* [C] Prague, 2003 526-539
- [7] João H, Daniel L, Eduardo D S. Nonlinear observability and an invariance principle for switched systems [A] *Proc of the 41th Conf on Decision and Control* [C] Las Vegas, 2002 4300-4305

(上接第 1348 页)

- [8] 蒋忠进, 林君, 陈祖斌, 等. 三阶累积量在可控震源地震时间剖面中压制旁瓣的应用 [J]. *地学前缘*, 2003, 1(1): 1431-1434  
(Jiang Z J, Lin J, Chen Z B, et al. The application of three-order cumulant on signal process for vibroseis exploration [J] *System Engineering and Electronic Technique*, 2003, 10(1): 1431-1434)

- [9] Nigel A Anstey. *Vibroseis* [M]. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1991 1-44
- [10] 朱崇灿, 黄景熙, 鲁述. 天线 [M]. 湖北: 武汉大学出版社, 1996 60-127.
- [11] Adrian Garrod. Digital modules for phase array radar [A] *IEEE Int Radar Conf* [C] Alexandria, 1995 726-731.