

# 可控震源定向照明方法的仿真研究

杨冬<sup>1,2</sup>, 姜弢<sup>2,3</sup>

(1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130026; 2. 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 长春 130026;  
3. 吉林大学地球信息探测仪器教育部重点实验室, 长春 130026)

**摘要** 当野外噪声很强,即使使用组合震源地震也无法获得满意信噪比的地震数据时,本文提出了一种基于可控震源阵列的定向照明控制方法,采用该方法可形成定向地震波.通过仿真研究合成了 8 激震器可控震源阵列分别采用简单组合及定向照明技术得到的单炮地震记录,可以看出采用合适的延时参数,定向照明单炮地震记录的反射波信噪比高于组合地震情况.定量的计算结果表明,实验条件下采用 0.89 ms 延时参数,各反射波信噪比分别提高了 10.19 dB, 3.23 dB 和 1.02 dB.由此可见,可控震源定向照明地震技术是一种提高原始地震资料信噪比的有效方法.

**关键词** 定向照明, 可控震源, 阵列, 反射波, 信噪比

**中图分类号** P631 **文献标识码** A **文章编号** 1004-2903(2008)03-0822-04

## Simulation on directional illumination method of controlled source array

YANG Dong<sup>1,2</sup>, JIANG Tao<sup>2,3</sup>

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. College of Instrument Science and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China;

3. Key Laboratory of geo-exploration instrumentation of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130026, China)

**Abstract** If noise from the field is so strong that we can not get data with proper signal-to-noise ratio (SNR) even if combination source is used, we develop a directional illumination method of controlled source, which can form a directional seismic wave. We make a numeric simulation of multi-trace seismograms and computed reflected waves' SNR improvement when directional illumination method of controlled source array was used in given horizontal stratified model. It shows the results that SNR of reflected waves from different reflectors increase 10.19 dB, 3.23 dB, and 1.02 dB respectively than the case of combination source when 8-unit controlled source array were used with delay time of 0.89 ms. And therefore the directional illumination control method of controlled source array is competent to improve seismic signal SNR.

**Keywords** directional illumination, controlled source, array, reflected wave, signal-to-noise ratio (SNR)

## 0 引言

可控震源<sup>[1]</sup>是一种非破坏性震源,在实际地震勘探中得到广泛应用.由于其输出力小,造成接收信号信噪比较低,直接影响地震勘探效果.为此人们研究了多种提高地震资料信噪比<sup>[2~5]</sup>的技术,本文通过对可控震源定向照明技术的研究提出了改善地震信号质量的新方法.实际地震勘探中,当单个可控震源地震信号的信噪比无法满足勘探要求,一般采用

多台震源组合共震<sup>[6]</sup>的方式.组合震源地震能够改善信噪比,但实际工作的组合台数一般不超过 3~4 台,若震源台数进一步增加,成本增加的同时,信噪比改善却不明显,原因是组合震源产生的地震波是一种定向地震波<sup>[6]</sup>,且该地震波的主波束方向垂直地面向下,而检波器阵列接收的反射地震波方向并不是地震波最强的方向.为此,及我们借鉴相控雷达技术<sup>[7~11]</sup>及地震照明分析<sup>[12~14]</sup>技术,研究了一种定向照明控制方法,通过控制定向地震波方向,达到改

收稿日期 2007-10-10; 修回日期 2008-01-20.

基金项目 国家自然科学基金项目(40674096)资助.

作者简介 杨冬,女,1971 年生,吉林长春人,吉林大学地球科学学院博士研究生,主要研究方向矿产资源勘查. (E-mail: yd@jlu.edu.cn)

善反射地震信号的信噪比的目的. 本文通过仿真研究阵列可控震源定向照明控制技术.

1 原理

可控震源定向照明控制系统由多个激震器及一个能提供延时控制的定向照明控制系统组成,  $n$  个激震器以等间距  $d$  排成一行, 并与检波器阵列共线. 由于各震源空间位置的差异, 各震源产生的地震波信号经目标地层反射后到达检波器的波程不等即存在波程差. 为了使检波器处地震波信号最强, 可以通过控制相邻震源的延时时间间隔  $\tau$ , 进而控制输出信号的相位差, 用各震源信号的相位差补偿波程差, 使得各震源产生的地震波信号经反射后在检波器上正好同相叠加, 最大限度地提高接收信号的信噪比.

具体地, 通过控制各激震器以等时间间隔依次延时震动, 可以形成定向地震波. 定向地震波的方向因子

$$F_a(\varphi) = \frac{\sin n((kd \cos \varphi + 2\pi f \tau)/2)}{n \sin((kd \cos \varphi + 2\pi f \tau)/2)},$$
$$(\varphi \in [0^\circ, 180^\circ]). \tag{1}$$

公式 1 的极值点即定向地震波方向  $\varphi_M = \arccos(\tau \cdot v/d)$ , 这里  $\tau$  是延时间隔,  $v$  是波速,  $d$  是相邻激震器间距. 就方向性而言, 对于来自任意方向  $\varphi$  的地震波, 接收信号中地震波信号的振幅是单震源情况的  $A_p = n \cdot |F_a(\varphi)|$  倍.

2 方法

对地震波的仿真考虑了直达波和来自  $m$  个目标层的反射波. 单震源情况下, 第  $i$  个检波器接收的地震波

$$q_i(t) = \sum_{j=0}^m r_{i,j}(t) + N_i(t),$$

其中  $r_{i,0}(t)$  是直达波,  $r_{i,j}(t)$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) 是反射波,  $N_i(t)$  代表噪声; 对于可控震源定向照明控制系统, 第  $i$  个检波器接收的地震波信号

$$P_i(t) = \sum_{j=0}^m n \cdot |F_a(\varphi_{i,j})| \cdot r_{i,j}(t) + N_i(t), \tag{2}$$

这里  $\varphi_{i,0}$  代表直达波方向,  $\varphi_{i,j}$  代表第  $i$  个检波器接收到的来自第  $j$  个反射层的反射波方向.

对各检波器接收的可控震源地震信号<sup>[16]</sup>作相关检测<sup>[17~20]</sup>, 即可得到含有时延信息的地震记录.

3 结果

实验参数如下: 震源系统采用 chirp 信号, 扫频范围 50 Hz~200 Hz, 组合、相控震源均采用  $n = 8$

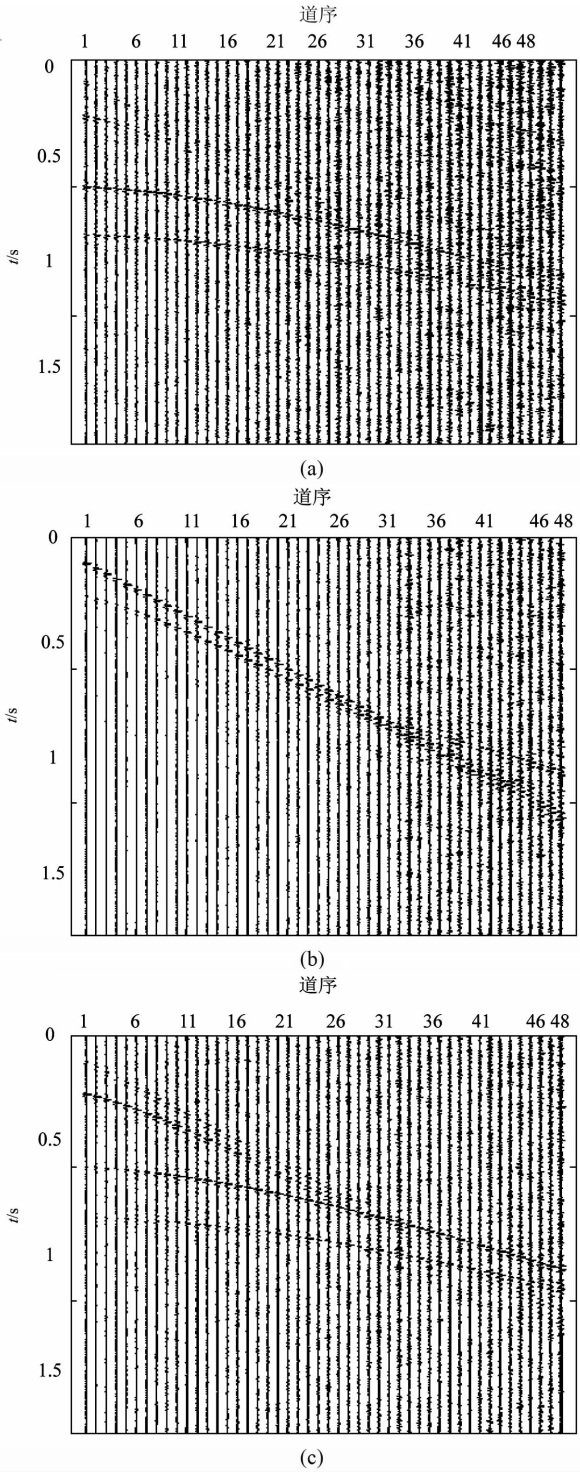


图 1 简单组合与定向照明单炮地震记录  
(a) 简单组合; (b) 定向照明  $\tau = 1.89\text{ms}$  ;  
(c) 定向照明  $\tau = 0.89\text{ms}$  ;

Fig. 1 Synthetic seismogram of combination and directional illumination

(a) Combination; (b) Directional illumination  $\tau = 1.89\text{ms}$  ;  
(c) Directional illumination  $\tau = 0.89\text{ms}$

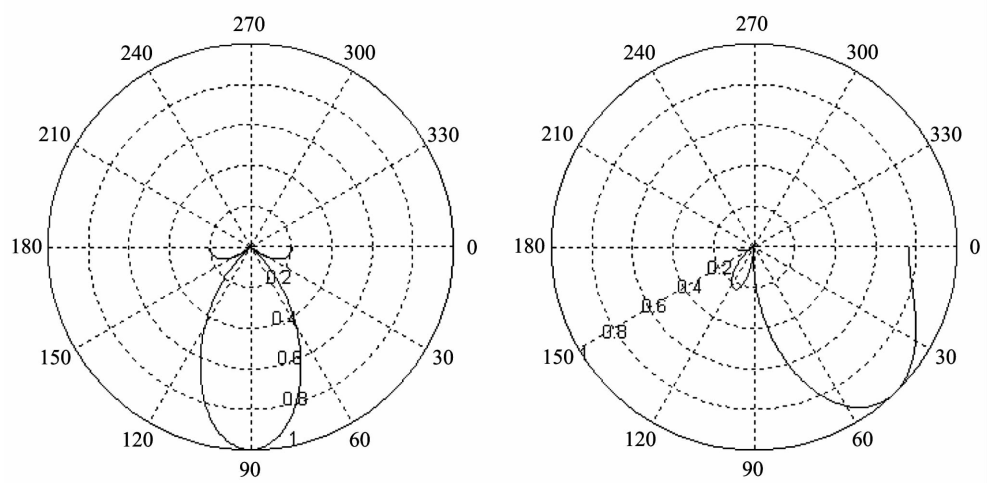


图 2 简单组合与定向照明单炮地震波方向图  
(a)  $f=125\text{ Hz}$  时的组合震源地震波方向图;(b)  $f=125\text{ Hz}$  时的相控震源地震波方向图  
Fig.2 Seismic wave direction graph of combination and directional illumination  
(a) Combination at  $f=125\text{Hz}$ ; (b) Directional illumination at  $f=125\text{Hz}$

个激震器.接收系统偏移距 100 m,道间距 20 m.地下介质模型含  $m=3$  个水平反射层,从地表开始,第一层厚度为 100 m,介质波速为 1000 m/s;第二层厚度为 250 m,介质波速为 1700 m/s;第三层厚度为 180 m,介质波速为 1900 m/s;第四层介质波速为 2200 m/s.

图 1(a)为合成的组合震源单炮地震记录,图 1(b)(c)分别为延时参数  $\tau=1.89\text{ms}$  和  $\tau=0.89\text{ms}$  时的定向照明单炮地震记录,它们对应的定向地震波方向为  $\varphi_M=37.16^\circ$  和  $\varphi_M=46.28^\circ$ ,方向图如图(2)所示.

同组合震源相比,图 1(b)合成地震记录中来自第一个目标层的反射波得到明显加强.通过仿真计算,第一个反射波信噪比提高 13.91dB,第二、三个反射波信噪比分别降低了 2.39dB 和 6.34dB;图 1(c)合成地震记录中来自三个目标层的反射波信噪比均得到改善,来自第一、二、三反射层的反射波信噪比分别提高了 10.19dB、3.23dB、1.02 dB,对第一个反射波信噪比的改善不如  $\tau=1.89\text{ms}$  的情况.

4 结 论

根据仿真结果可得到如下结论:采用定向照明控制方法,可以选择性地提高来自不同反射面的反射波的信噪比.定向照明延时参数改变,对反射波信噪比会产生不同的影响.在对特定目标层详细勘探时,只有选择合适的延时时间,才能获得高质量地震资料.对于地震勘探新区,也可以采用定向照明地震方法,

此时延时时间的选择需要根据测区的物探资料及前期试验来确定.本文的仿真研究说明,可控震源定向照明控制方法是一种提高地震信号信噪比的有效方法.根据理论分析和图 1 的仿真结果可以看出,采用定向照明控制方法深层近炮点道资料信噪比不如组合震源情况,该问题的解决有待进一步研究.

致 谢 感谢林君教授在本论文研究中给予的帮助.

参 考 文 献 (References):

[1] Nigel A. Vibroseis[M]. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1991.

[2] 胡天跃,王润秋,White R E. 地震资料处理中的聚束滤波方法[J]. 地球物理学报, 2000, 43(1): 105~115.  
Hu T Y, Wang R Q, White R E. Beamforming in seismic data processing[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2000, 43 (1): 105~115

[3] 洪菲,胡天跃,张文坡,等. 用优化聚束滤波方法消除低信噪比地震资料中的多次波[J]. 地球物理学报, 2004, 47(6): 1106~1110.  
Hong F, Hu T Y, Zhang W P, et al. Attenuating multiples for low signal-to-noise ratio seismic data using optimal beamforming[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2004, 47(6): 1106~1110

[4] 李辉,戴旭初,葛洪魁,王宝善,林建民,陈颢. 基于互信息量的地震信号检测和初至提取方法[J]. 地球物理学报, 2007, 50 (4): 1190~1197.  
Li H, Dai X C, Ge H K, Wang B S, Lin J M, Chen Y. Seismic signal detection and first arrival pickup based on mutual infor-

mation[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2007, 50(4): 1190~1197.

[5] 葛洪魁,林建民,王宝善,宋丽莉,罗桂纯,陈颢. 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, Song L L, Luo G C, Chen Y. A field experiment study of improving the seismic detectability with coded source[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(3): 864~870.

[6] Arnold M E. Beam forming with vibrator arrays[J]. Geophysics, 1977, 42(7): 1321~1338.

[7] Mosc S, Bilotti F, Toscano A, Vegni L. A novel design method for Blass matrix beam-forming networks. Antennas and Propagation[J]. IEEE Transactions on, 2002, 50(2): 225~232.

[8] Miura R, Tanaka T, Chiba I, Horie A, Karasawa Y. Beam-forming experiment with a DBF multibeam antenna in a mobile satellite environment[J]. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 1997, 45(4): 707~714.

[9] Kraft U R. Gain and G/T of multielement receive antennas with active beamforming networks. Antennas and Propagation[J], IEEE Transactions on, 2000, 48(12): 1818~1829.

[10] Denno S, Ohira T. Modified constant modulus algorithm for digital signal processing adaptive antennas with microwave analog beamforming[J]. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 2002, 50(6): 850~857.

[11] 杨桃,陈克雄,周脉鱼,等. SAR 图像中目标的检测和识别研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 617~621.

Yang G, Chen K X, Zhou M Y, *et al.* Study evolution of detection and recognition on target in SAR image[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(2): 617~621.

[12] Xie X B, Jin S W, Wu R S. Wave Equation based illumination analysis. Expanded Abstract of 74th Annual International SEG Meeting, 2004. 933~936.

[13] 陈生昌, 马在田. 广义地震数据合成及其偏移成像[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1144~1149.

Chen S C, Ma Z T. Generalized synthesis of seismic data and its migration[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(4): 1144~1149.

[14] 陈生昌, 马在田, Wu Ru-Shan. 波动方程偏移成像阴影的照明补偿[J]. 地球物理学报, 2007, 50(3): 844~850.

Chen S C, Ma Z T, Wu R S. Illumination compensation for wave equation migration shadow[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2007, 50(3): 844~850.

[15] 林君, 陈鹏程, 姜弢, 等. 浅层地震探测的可控震源信号设计[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(4): 807~811.

Lin J, Chen P C, Jiang T, *et al.* The signal design of electrodynamic vibroseis for surface Imaging. Progress in Geophysics. (in Chinese), 2004, 19(4): 807~811.

[16] 齐诚, 陈棋福, 陈颢. 利用背景噪声进行地震成像的新方法[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(3): 771~777.

Qi C, Chen Q F, Chen Y. A new method for seismic imaging from ambient seismic noise[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(3): 771~777.

[17] 姜弢, 林君, 陈祖斌, 等. 相控震源地震波定向技术[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2004, 22(3): 181~184.

Jiang T, Lin J, Chen Z B, *et al.* Seismic beam-forming in phased array of vibroseis. Journal of Jilin University (Information science edition). (in Chinese), 2004, 22(3): 181~184.

[18] 姜弢, 林君, 陈祖斌, 等. 可控震源相控地震的相关检测技术[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(4): 336~339.

Jiang T, Lin J, Chen Z B, *et al.* The Correlation Detect ion Method of Signals in Phased Array of Vibroseis System. Chinese Journal of scientific Instrument. (in Chinese), 2005, 26(4): 336~339.

[19] 姜弢, 林君. 相控震源与组合震源信号检测结果对比[J]. 控制与决策, 2004, 19(12): 1345~1348.

Jiang T, Lin J. Comparison of the detected seismic signals between phased array and combination vibroseises. Kongzhi yu Juece/Control and Decision. (in Chinese), 2004, 19(12): 1345~1348+1353.

[20] 马丽娟, 郑和荣, 陈霞. 隐蔽油气藏地震预测技术研究新进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 294~300.

Ma L J, Zheng H R, Chen X. The New progress of seismic forecast technology of Subtle Traps[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(1): 294~300.