

# 可控震源定向地震波合成方法仿真研究

刘淑聪, 宋燕星, 刘畅

防灾科技学院防灾仪器系, 河北三河 065201

**摘要** 为了在可控震源地震勘探时,提高地震数据的信噪比和分辨率,根据相控震源原理,通过对单震源地震信号进行延时叠加,可以等效合成定向地震波信号,节省地震勘探成本。针对水平单层和多层模型,本文给出了采用单震源和单震源定向合成技术时各反射地震波的信噪比,仿真计算结果表明,单震源定向合成地震记录可以提高反射地震波信号的信噪比。通过对野外数据的定向照明合成进行信噪比改善的分析,基于单震源定向合成记录相对于单震源的信噪比平均提高了6.4041dB,有效地改善了地震勘探效果。

**关键词** 可控震源;地震波;信噪比;仿真;信号处理

**中图分类号** P631

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.06.008

## The Simulation on Directional Synthetic Seismic Algorithm of Vibrator

LIU Shucong, SONG Yanxing, LIU Chang

Department of Disaster Prevention Apparatus, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei Province, China

**Abstract** In order to increase the Signal to Noise Ratio (SNR) and resolution of seismic data for the vibrator seismic exploration, according to the principle of phased-controlled sources, by means of delay and superposition on single source seismic signals, directed seismic signal is able to be equivalently synthesized for saving the cost of exploration. For horizontal single-layer and multi-layers model, the SNR of seismic waves is presented when the single source and single source directed synthesis techniques are used, and the simulation results show that the single-source directed synthetic seismic waves could effectively improve the SNR of seismic waves. Through the analysis on the SNR improvement due to the directional lighting synthesis of field data, the SNR of directional synthetic records based on single-source is improved by the average of 6.4041 dB comparing with the SNR of single source. The effects of seismic exploration are effectively improved.

**Keywords** vibrator; seismic waves; SNR; simulation; signal processing

### 0 引言

可控震源<sup>[1-2]</sup>技术是地震勘探领域的一种重要勘探技术。由于其输出力小,造成可控震源地震信号的信噪比较低,提高地震资料的信噪比和分辨率是可控震源技术用于地震勘探的关键所在。在实际地震勘探中,单震源成本低,信噪比无法满足要求;相控震源信噪比高,并可产生任意方向的定向地震波,但应用时存在成本高、控制复杂、一致性差等问题。地震照明分析是认识和研究地震数据采集时能量在地下地质结构中分布的有效手段,通过对先验的目标地质模型进行有效的地震照明分析,可以清楚地识别地震波能量分布特征,指导观测系统设计及提高成像质量<sup>[3]</sup>。陈秀梅等<sup>[4]</sup>(2003

年)针对复杂介质情况,适当选取多个目标层进行地表控制照明,实现了对整个剖面多个复杂目标区域的高精度成像。为提高可控震源信噪比,应该结合单震源和相控震源优点提出一种定向照明地震信号合成方法,使信号的信噪比得到改善,而且具有需要震源数目少、工作成本低、操作简单等优点。本文针对单一水平地层和水平层状地下模型,给出了采用单震源和定向照明合成时各地震记录的信噪比;通过对比,论证了定向照明合成地震记录应用于水平地层探测的可行性和良好的信噪比性能;通过对野外实际数据的定向照明合成进行信噪比改善的分析,进一步论证定向照明地震信号合成方法在可控震源勘探中可以进行有效应用。

收稿日期:2012-01-12;修回日期:2012-02-12

基金项目:防灾减灾青年基金项目(201011)

作者简介:刘淑聪,讲师,研究方向为信号处理,电子邮箱:luckycong2009@sina.com

### 1 方法

由惠更斯-菲涅耳原理可知, 常规单震源地震的能量全部集中在球面波阵面上。相控震源采用波束定向技术<sup>[5]</sup>, 可使地震波能量集中在形状可控的波阵面上, 通过设计相控震源与观测排列的空间位置, 面向目标区域, 可使多波叠加, 在增强地震波能量的同时, 还能使检波器获得良好的地震响应, 提高地震记录的信噪比<sup>[6]</sup>。

相控震源的相邻激震器保持相等的时间间隔  $\tau$  依次起震, 可以产生定向地震波<sup>[7]</sup>, 设相控震源的激震器数目为  $n=3$ , 令  $i$  为地震道的标号, 检波器阵列接收的定向地震波信号可记作  $s(i, t)$ 。由波动方程可知, 相控震源产生的地震波场可等效于多个震源分别作用产生的波场, 因此可以采用在 3 个不同炮点处分别实施单震源地震, 即移动炮点并保持检波器阵列位置不变, 依次取得各炮点的单炮地震数据。根据相控震源的延时工作原理, 将等间隔延时后的单炮地震数据做线性叠加, 可以合成具有方向性定向照明地震信号。对应第  $j$  个炮点, 第  $i$  道检波器接收的信号记作是  $s_j(i, t)$ , 则有

$$s(i, t) = \sum_{j=1}^n s_j(i, t - (j-1) \cdot \tau) \quad (1)$$

式(1)表明, 合理布设观测系统, 利用单震源地震信号和延时叠加, 可以等效合成定向地震波信号。为了得到与爆炸震源地震信号类似的结果, 需将调频的地震波信号压缩成带有反射界面信息的脉冲信号, 通常采用相关检测方法作为研究定向照明信号检测的主要方法。单震源情况下, 对应第  $j$  个炮点, 第  $i$  道检波器接收的信号  $s_j(i, t)$  包含 1 个直达波  $r_{i,0}(t)$  和  $m$  个反射波  $r_{i,j}(t)$ , 即

$$s_j(i, t) = \sum_{j=0}^m r_{i,j}(t) \quad (2)$$

根据相控震源的延时工作原理, 必有

$$s(i, t) = \sum_{j=1}^n s_j(i, t - (j-1) \cdot \tau) \quad (3)$$

考虑噪声, 基于单震源合成定向地震波实际接收的含噪声信号为

$$rmixd_i(t) = s(i, t) + r_N(t) \quad (4)$$

$$ref(t) = s \left( t - \frac{n-1}{2} \tau \right) \quad (5)$$

基于单震源等效合成定向地震波信号采用  $ref(t)$  作为参考信号。含有时延信息的定向合成地震记录为  $ref(t)$  与  $rmixd_i(t)$  的互相关。

### 2 定向合成地震波仿真

#### 2.1 定向合成地震波仿真实验条件

为对比分析单震源、定向合成地震波的实验数据和结果, 要求在相同的实验条件下。

(1) 可控震源的工作参数: 单个可控震源的控制信号采用线性变频扫描 chirp 信号。设起始扫描频率  $f_1=50\text{Hz}$ , 终止扫描频率  $f_2=200\text{Hz}$ , 扫描时间  $t'=4\text{s}$ , 扫描信号幅度  $A$ ,  $t$  为时间

变量, 则扫描信号为

$$s(t) = A \cos 2\pi \left( f_1 + \frac{f_2 - f_1}{2t'} t \right) t \quad (6)$$

(2) 地震仪参数: 地震仪采样频率 4kHz。

(3) 接收系统参数: 采用均匀排列的 24 个检波器作为接收系统, 接收系统偏移距 150m, 道间距为 20m。

(4) 噪声系数采用 25dBW 噪声强度随机高斯白噪声。

(5) 地层信息: 单一水平地层自上而下共存在 1 个反射层, 厚度 100m, 波速 800m/s, 直达波波速 800m/s。水平层状介质模型含 3 个水平反射层, 从地表开始, 直达波波速为 800m/s, 第 1 层厚度为 150m, 介质波速为 800m/s; 第 2 层厚度为 350m, 介质波速为 1500m/s; 第 3 层厚度为 400m, 介质波速为 2000m/s; 第 4 层介质波速为 2200m/s。

#### 2.2 地震波信噪比计算

为了验证单震源定向合成地震波对信噪比的改善能力, 在同一测区进行了单震源、单震源定向合成地震波对比实验。为了进行单震源定向合成地震波对信噪比的改善分析, 需要计算反射波信号的信噪比。

用  $r_{i,j}(i=1, 2; j=3, 4, \dots, 26)$  分别表示单个震源、单震源定向合成地震波时第  $j$  道目标反射波信号信噪比; 用  $P_{i,j}$  分别表示单个震源 ( $i=1$ )、单震源定向合成地震波 ( $i=2$ ) 时第  $j$  道目标反射波信号的功率。实验是在同一测区和相同观测系统下完成的, 因此可以近似地认为环境噪声相同, 用  $P_N$  表示噪声功率。由信噪比定义, 有

$$r_{i,j} = 10 \lg \frac{P_{i,j}}{P_N} \quad i=1, 2 \quad (7)$$

实际勘探中, 由于噪声和地质环境的复杂性, 准确地从接收信号中区分信号和噪声几乎不可能。因此一般采用间接计算单震源定向合成地震波对信噪比的改善。定义  $R_j$  为单震源定向合成地震波相对于单个震源第  $j$  道信噪比改善, 即

$$R_j = r_{2,j} - r_{1,j} \quad (8)$$

设  $P'_{i,j}(i=1, 2)$  分别为单个震源、单震源定向合成地震波时第  $j$  道目标反射波信号的功率 (含噪声), 则有

$$P'_{i,j} = P_{i,j} + P_N \quad i=1, 2 \quad (9)$$

由于浅层反射波信号的信噪比很高, 即

$$P_{i,j} \gg P_N \quad i=1, 2 \quad (10)$$

根据式(9), 可以得到

$$P'_{i,j} \approx P_{i,j} \quad i=1, 2 \quad (11)$$

由式(7)、(8)和(11), 得到

$$R_j \approx 10 \lg \frac{P'_{2,j}}{P'_{1,j}} \quad (12)$$

根据式(12), 可以计算单震源定向合成地震波对对各道反射波信号信噪比的改善程度<sup>[8-9]</sup>。

为了评价单震源定向合成地震波对单震源地震数据信噪比的改善程度, 定义

$$R_0 = \frac{1}{24} \sum_{j=3}^{26} R_j \quad (13)$$

式中,  $R_0$  为单震源定向合成地震波对单震源各道信噪比改善的算术平均值。由式(12)和(13), 可得到单震源定向照明技术相对于单震源地震记录的信噪比改善能力。

### 2.3 单一水平地层模型下定向合成地震波仿真

图 1 给出了单一水平地层模型下单震源地震记录和单震源定向合成的地震记录对比。从图 1 可以看出, 单震源定向合成的地震记录对地震信号的反映效果要好于单震源地下信息勘探的效果。表 1 为单震源和单震源合成地震记录信噪比改善的对比, 与单震源情况相比, 单震源定向合成地震方法使各道反射波信号信噪比提高了 0.4011—6.3047dB, 单震源道平均 SNR 为 -25.7192dB, 定向合成地震记录道平均 SNR 为 -20.9101dB, 定向合成地震记录相对于单震源信噪比平均提高了 4.8091dB, 地震信号分辨率提高了 18.7%。由此可得出单震源定向合成的地震记录可以提高地震数据的信噪比和分辨率。

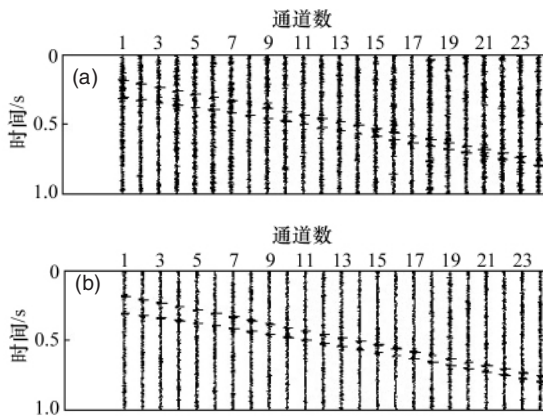


图 1 单一水平地层模型下单震源地震记录 (a) 和基于单震源定向合成的地震记录 (b)

Fig. 1 Seismic records (a) and directional synthetic seismic based records (b) on single-source for the single level models

表 1 单一水平地层模型下单震源、定向合成地震记录的 SNR 和 SNR 改善对比

Table 1 SNR improvement between of single source records and directional synthetic records for single-level models

道数	单震源 SNR/dB	定向合成地震记录 SNR/dB	定向合成相对于单震源 SNR 改善/dB
2	-20.0787	-19.6776	0.4011
4	-22.7336	-16.4289	6.3047
8	-19.5469	-16.4213	3.1256
16	-17.1457	-12.7282	4.4175
24	-20.6954	-18.8953	1.8001
平均	-25.7192	-20.9101	4.8091

### 2.4 水平层状介质模型下定向合成地震波仿真

图 2 为水平层状介质模型下单震源地震记录和基于单

震源定向合成地震记录。从图中可以看出基于单震源定向合成的地震记录分辨率要好于单震源地震记录, 信噪比较高。

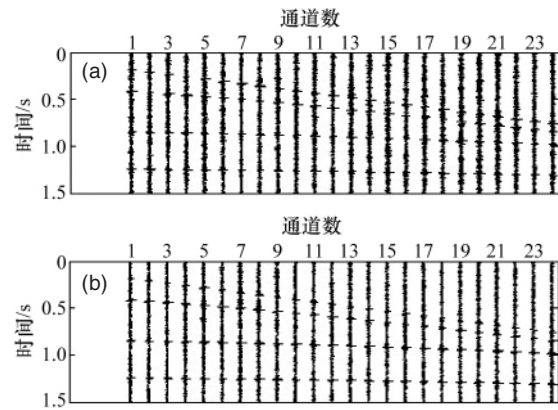
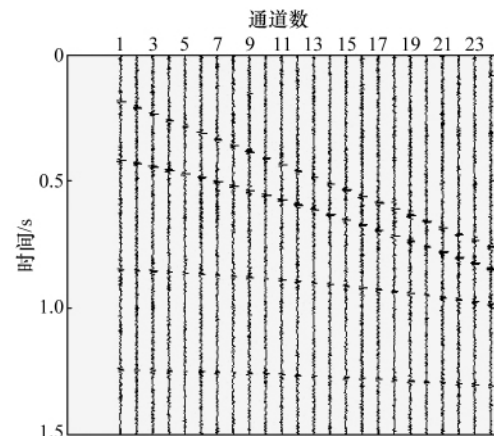


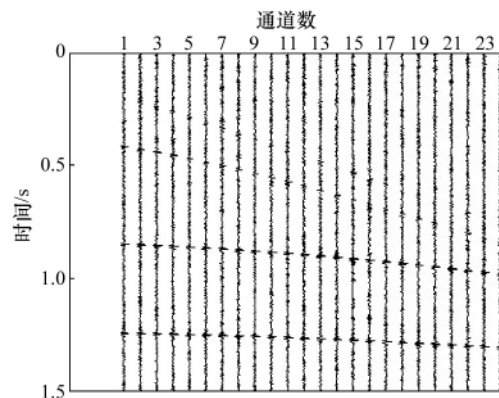
图 2 水平层状介质模型下单震源地震记录 (a) 和基于单震源定向合成的地震记录 (b)

Fig. 2 Seismic records (a) and directional synthetic seismic records (b) on single-source for horizontal layers model

在水平层状介质模型下, 延时参数的改变会引起定向地震波方向的变化。图 3(a) 的  $\tau=1.9\text{ms}$ , 来自第 1 个反射层的反



(a)  $\tau=1.9\text{ms}$



(b)  $\tau=0.28126\text{ms}$

图 3 水平层状模型不同延时参数下定向合成的地震记录  
Fig. 3 Directional synthetic seismic records for horizontal layers model with the different delay parameters

射波信号得到加强;图 3(b)的  $\tau=0.28126\text{ms}$ ,来自第 3 个反射层的反射波信号得到加强。延时参数的改变可使定向地震波方向改变,从而使地震剖面图发生一定变化。因此,通过合理选择延时时间,可以人为地控制加强来自不同反射面的反射波,获得高质量地震资料,而且可以对地下特定位置特定构造的区域进行详细勘探和分析。

### 3 实际数据等效合成定向地震记录实验

在实际野外地震勘探中,相控震源不可避免地面临一致性和可靠性及多随机噪声叠加等问题,信噪比一般低于通过后期数据处理而等效合成的地震记录。2011 年北京某郊区一次野外实验,震源系统采用 3 个震源,相邻震源按给定间距均匀排列,间距 2m,震源控制信号频率为 50—500Hz;观测系统采用德国 24 道 Summit 分布式地震仪,道间距 1m,偏移距 10m,炮点距 2m,检波器阵列与震源阵列共线,地震仪采样率为 4kHz,记录时间 6s。

图 4 为实际单震源地震记录和等效合成后的地震数据记录。通过对比实验研究可以看出单震源地震记录的初至不是很明显,而基于单震源的定向照明合成记录的初至相对清晰,同时还可观察到基于单震源的定向照明技术激发的反射地震波信号信噪比较高。

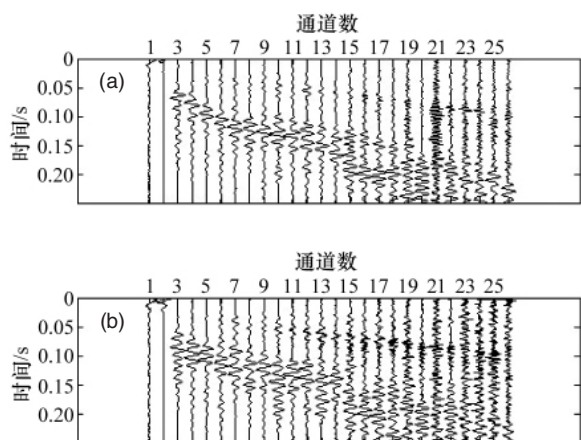


图 4 实际单震源地震记录(a)和等效合成后的地震数据记录(b)

Fig. 4 Actual single-source seismic records (a) and the equivalent synthetic seismic records (b)

从表 2 可以得出,基于单震源定向合成记录相对于单震源的 SNR 平均提高了 6.4041dB。由此说明基于单震源定向合成地震波不仅可以很好地改善地震波信号的信噪比,而且比相控震源具有更大的灵活性和高效率性。基于单震源的定向地震波合成方法是可用的,能够改善地震信号的信噪比,提高地震剖面图质量。

表 2 实际数据合成的基于单震源定向照明技术相对于单震源的 SNR 改善

Table 2 SNR improvement of single source directional synthetic records respect to the single source based on the actual data

道数	6	10	16	22	25	平均
定向照明相 对于单震源 SNR 改善值 /dB	6.4014	6.0354	6.7710	6.3122	6.8133	6.4041

### 4 结论

通过对单震源地震波数据合成的仿真研究,针对给定的水平单层地层模型和水平层状介质模型,计算并对比了单震源信号和基于单震源定向合成地震波信号的信噪比,证明基于单震源定向合成地震波的方法可显著改善信噪比,提高地震资料的分辨率,节省地震勘探成本。

### 参考文献 (References)

- [1] Nigel A. Vibroseis[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1991.
- [2] 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 Jun, Chen Zubin. *Chinese Science Abstracts*, 1999, 5(6): 811-812.
- [3] 汪勇, 顾汉明, 范宝仓. 某工区基于地震照明技术的观测系统分析及优化[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(3): 59-64.  
Wang Yong, Gu Hanming, Fan Baocang. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2010, 32(3): 59-64.
- [4] 陈秀梅, 王华忠, 马在田. 多地质目标地表控制照明叠前深度偏移[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(5): 507-511, 542.  
Chen Xiumei, Wang Huazhong, Ma Zaitian. *Oil Geophysical Prospecting*, 2003, 38(5): 507-511, 542.
- [5] 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.
- [6] 杨冬, 姜弢. 可控震源定向照明方法的仿真研究 [J]. 地球物理学进展, 2008, 23(3): 822-825.  
Yang Dong, Jiang Tao. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(3): 822-825.
- [7] 姜弢, 林君, 杨冬, 等. 相控震源定向地震波信号分析 [J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1551-1556.  
Jiang Tao, Lin Jun, Yang Dong, et al. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(5): 1551-1556.
- [8] 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 Tao, Lin Jun, Chen Zubin, et al. *Journal of Jilin University: Information Science Edition*, 2004, 22(3): 181-184.
- [9] 徐峰, 刘福烈, 梁向豪. 基于相控理论的炮点组合设计技术[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(2): 170-175.  
Xu Feng, Liu Fulie, Liang Xianghao. *Oil Geophysical Prospecting*, 2011, 46(2): 170-175.

(责任编辑 朱宇)