

海洋电磁式可控震源信号扫描方法

孙 锋,陈祖斌,林 君

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院,长春 130026)

摘要:在现有可控震源技术的研究基础上,结合海洋电磁式可控震源的特点,对相关时延估计算法进行了研究,通过计算机仿真实现了一种适合于海洋电磁式可控震源的扫描方式,并对可控震源-海水能量耦合系统进行测试,得到了可用的可控震源扫描信号地震子波。

关键词:测绘仪器;海洋地震勘探;可控震源;扫描方式;相关噪声;扫描方法

中图分类号:P631.43 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2009)02-0536-05

Sweep technique of electrical marine vibrator

SUN Feng, CHEN Zu-bin, LIN Jun

(College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: On the basis of existing vibrator technique, the correlation arithmetic of time-delay estimate is studied by computer simulation to characterize the electrical marine vibrator. A sweep technique suitable for electrical marine vibrator is developed. Furthermore, vibrator-water coupling system is tested and the reasonable seismic wavelet of marine vibrator is obtained.

Key words: instrument of surveying and mapping; seismic exploration; vibrator; sweep mode; correlation noise; sweep method

在海洋地震震源市场中,气枪震源一直占据着主导地位,实际工作中,气枪震源子波的能量与频宽是一对矛盾^[1],二者很难兼顾。另外,气枪震源通过高压空气释放到水中后迅速膨胀,产生压力脉冲形成地震子波,显而易见,不同的海水环境难以保证空气能量释放信号的一致性。在近海水域以及某些环境敏感区域的高分辨率地震勘探中,科学家们一直在寻求一种更安全、更有效的替代震源。1967年,Robinson^[2]等人将地震勘探与声纳技术进行了有机的结合,在美国 Texas、Louisiana、Mississippi 等地的海滨用 Marine Vibroseis 系统得到了高分辨率的近海海域地震剖面。1987年,荷兰的 Baeten^[3]等科学家基于同

样的原理通过 Marine Vibrator 与海底耦合模型的研究,对开展海底可控震源地震勘探研究进行了积极的尝试,并发展成为当前市场上由 Industrial Vehicles International, Inc. 推广的应用于环境领域的海洋可控震源。2006年7月,PGS (Petroleum Geo-Services) 美国公司的 Tengeham^[4] 在 AESC2006 (Australian Earth Sciences Convention)会议上介绍了 PGS 的最新研究成果^[5]:一种基于 Flexensional Shell 结构的电磁式海洋可控震源,该震源以 2 个激震器为 1 组,完成 6~100 Hz 频程的扫描,其中 1 个工作在 6~20 Hz 频段,而另一个工作在 20~100 Hz 频段,激震器在各自的工作频率范围内保证最大

收稿日期:2007-12-12.

基金项目:“863”国家高技术研究发展计划项目(2006AA09Z335);国家自然科学基金项目(40574079).

作者简介:孙锋(1981-),男,博士研究生.研究方向:地震勘探仪器. E-mail:sunfeng4997@yahoo.com.cn

通信作者:陈祖斌(1971-),男,副教授.研究方向:地震数据处理,地震勘探仪器. E-mail:czb@jlu.edu.cn

激震力的输出。但该类震源的局限性体现在其定点工作方式上,让地震数据采集工作载体停止后进行相应的记录,其难度较大,该缺陷大大制约了同类海洋可控震源的推广。

与国外相比,我国的可控震源技术整体滞后。在陆地可控震源方面,我国从 20 世纪 80 年代起开始基于对国外装备的仿制,进行可控震源的国产化研制。1995 年,吉林大学(原长春地质学院)开始了基于电磁驱动的高频可控震源的研制^[6-9],并于 1999、2005 年相继推出了 500 N、10000 N 输出力的轻便型电磁式可控震源,该震源系统工作频率为 10~2000 Hz,并以此为原型开始研制国内首台适合于海洋地震勘探的电磁式可控震源。

本文提出一种基于海洋电磁式可控震源的扫描方式,由数字合成单元产生扫描信号,经过功率放大器后驱动置于海水中的电磁激振器,激振器通过特定的传动装置激励海水,产生完全可重复的地震勘探信号。

1 可控震源信号扫描技术

目前在野外的实际工作中,Chirp 信号线性扫描仍是一种最基本的扫描方式,其数学表达式为

$$s(t) = A \sin 2\pi \left[f_0 + \frac{\Delta f}{2T} t \right] t \quad (1)$$

$$0 \leq t < T$$

式中: A 为信号幅度;频带宽度 $\Delta f = f_2 - f_1$, 其中 f_1 为起始频率, f_2 为终止频率; T 为扫描时间长度; t 为记录时间变量;中心频率 $f_0 = (f_2 + f_1)/2$ 。

线性扫描的主要描述参数包括: f_0 、 T 和 Δf 。在可控震源地震勘探中,要想得到常规意义下的地震子波,必须对可控震源扫描信号产生的回波信号进行相关时延估计。

通常经过适当的近似,线性扫描信号 $s(t)$ 的自相关函数 $\Phi(t)$ 可以被描述为

$$\Phi(t) = \frac{A^2}{2} \frac{T \sin \pi \Delta f \tau}{\pi \Delta f \tau} \cos 2\pi \left[f_0 + \frac{\Delta f}{2T} \tau \right] \tau \quad (2)$$

$$0 \leq \tau \leq T$$

式中: τ 为处理后的记录时间。

式(2)由常数 $A^2/2$ 、一个 $\sin x/x$ 衰减包络和一个余弦项相乘而得到,图 1 中实线部分为扫描信号的自相关函数,虚线部分为衰减包络。式(2)在 $1/\Delta f$ 的整数倍处幅度值为零,在衰减包络内

的振荡受余弦项内的变量所控制。自相关函数在

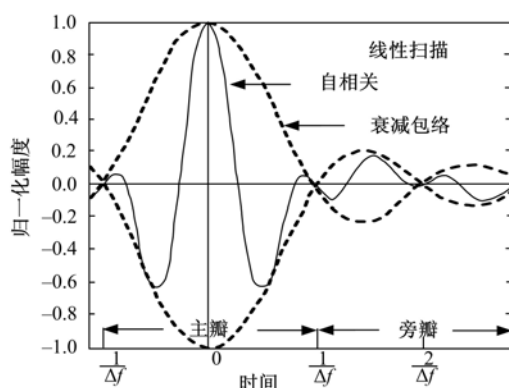


图 1 扫描信号的自相关函数

Fig. 1 Auto-correlation function of sweep signal

($-1/\Delta f, 1/\Delta f$) 内的部分为主瓣,该区间之外的部分为旁瓣。可控震源扫描信号自相关函数的波形决定着地震子波的信号质量,所有的扫描技术均围绕分辨率和信噪比展开研究,即提高扫描信号自相关函数主瓣的信号主频,充分压制旁瓣噪声。

基于此,Werner 和 Krey 于 1979 年提出联合扫描的想法^[10]:由两个或两个以上的短线性扫描段构成,段间可以隔以时隙(用于“听”)。联合扫描的出发点是利用多个频段各异的短扫描来实现弥补高频信息的损失,从而提高可控震源地震勘探的分辨率,联合扫描在减小相关噪声和增强所需频段上的作用是十分成功的。在联合扫描中,扫描段信号未被赋予极性,Edelmann、Berhardt^[11-12]等给不同的扫描段赋以极性(从而成为码元),而后以一定的编码顺序排列到一起,码和其补码间隔以时间段(用于“听”)形成了编码扫描^[13]。编码扫描的最佳效果是在每个 1 s 长的编码序列内有 8 个码元,常用的有二进制和四进制编码扫描。1979 年,Cunningham 又提出伪随机序列的扫描技术^[14],但在陆地可控震源地震勘探中,由于追求足够深度的探测目标导致可控震源激振器一般采用液压驱动方式,而且由于近地表地层对高频信号衰减严重等原因导致多数扫描方法对可控震源技术所描述的高分辨率地震勘探无法实施。

2 电磁式可控震源扫描方式设计

线性扫描、联合扫描和编码扫描等扫描方式均是针对陆地单个可控震源提出的理论。针对海

洋电磁式可控震源的特点,单纯使用上述几种扫描方式中的一种均无法满足海洋震源地震勘探的要求。在海洋勘探中,受到地震工作载体行驶的影响,震源扫描过程中无法采用长时间扫描方式,或者采用扫描一段时间后“听”一段时间再继续扫描的方式,采用类似这样的扫描方式会导致扫描的起始频率与终止频率的时间出现较大的偏差,最终影响地震勘探分辨率及准确性。结合陆地可控震源的几种扫描方式,本文提出了一种适合于海洋电磁式可控震源扫描方式——短时分段扫描,即将拟定频程的 Chirp 信号分为 N 段,每段信号时间跨度缩为 $1/N$,然后由 N 个激震器同时完成扫描。采用该扫描方式既能满足 Chirp 信号频程对地震子波分辨率的约束条件^[7],又能尽可能降低海洋勘察工作载体行进过程对地震勘探的不利影响。

海洋电磁驱动可控震源的能量激励单元由 3 个电磁激振器组成,每个电磁激振器都会产生 1 个 Chirp 扫描信号,每个 Chirp 扫描信号的扫描频率段是不同的,这样可以在短时间内输出足够频程跨度的扫描信号,达到提高地震子波主频的目的。若 3 个激振器分别扫描 $P(t)$ 中的一段信号,其输出信号如图 2 所示, $S(t)$ 是一个分段函数,有 3 个码源。将 $P(t)$ 与 $S(t)$ 相乘得到一个新的信号

$$R(t) = P(t) \times S(t) \quad (3)$$

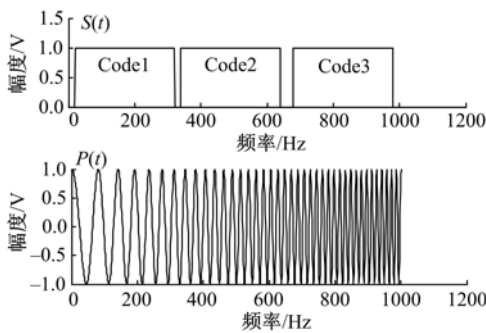


图 2 海洋可控震源分段扫描示意图

Fig. 2 Sketch map of segment sweep for marine vibrator

$S(t)$ 具有 3 个码源,每个码源对应一个激振器的振动频率段,这样 $R(t)$ 可以对应表示为 $R_1(t), R_2(t), R_3(t)$ 三个频率段,使用加速度传感器得到最终的信号为

$$A(t) = R_1(t) + R_2(t) + R_3(t) \quad (4)$$

由式(4)得到 3 个可控震源扫描频率段叠加后自相关的结果为

$$\begin{aligned} R_A(t) = E[(S_1(t) + S_2(t) + S_3(t))(S_1(t+\tau) + S_2(t+\tau) + S_3(t+\tau))] = & E[S_1(t)(S_1(t+\tau))] + E[S_2(t)(S_2(t+\tau))] + E[S_3(t)(S_3(t+\tau))] + \\ & E[S_1(t)(S_2(t+\tau))] + E[S_2(t)(S_3(t+\tau))] + E[S_1(t)(S_3(t+\tau))] + E[S_3(t)(S_2(t+\tau))] + \\ & E[S_3(t)(S_1(t+\tau))] + E[S_2(t)(S_1(t+\tau))] = \\ & R_{S_1}(t) + R_{S_2}(t) + R_{S_3}(t) + R_{S_1 S_2}(t) + R_{S_1 S_3}(t) + \\ & R_{S_2 S_3}(t) + R_{S_3 S_2}(t) + R_{S_3 S_1}(t) + R_{S_2 S_1}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $R_{S_1 S_2}(t), R_{S_1 S_3}(t), R_{S_2 S_3}(t), R_{S_3 S_2}(t), R_{S_3 S_1}(t)$ 和 $R_{S_2 S_1}(t)$ 为产生相关噪声的根源。

基于以上分析,模拟图 2 中的扫描过程,必定出现如图 3 所示的 2 个频率段信号(f_a, f_b, f_c, f_d

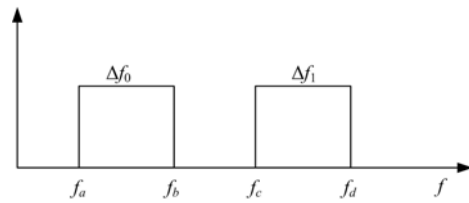


图 3 Chirp 信号扫描频率段

Fig. 3 Chirp signal sweep frequency

分别是两个频率段的起始和终止频率)进行互相关的运算结果

$$\begin{aligned} \phi_{S_1 S_2}(\tau) = & \frac{A^2 T}{2} \cos 2\pi \left[f_1 + \frac{\Delta f_1 \tau}{T} \right] \tau \cdot \\ & \frac{\sin \pi \left[\frac{f_d - f_c}{2} T + \Delta f_1 \tau - \frac{f_b - f_a}{2} T \right]}{\pi \left[\frac{f_d - f_c}{2} T + \Delta f_1 \tau - \frac{f_b - f_a}{2} T \right]} = \\ & \frac{A^2 T}{2} \cos 2\pi \left[f_1 + \frac{\Delta f_1 \tau}{T} \right] \tau \cdot \\ & \frac{\sin \pi \left((f_d - f_c - f_b + f_a) \frac{T}{2} + \Delta f_1 \tau \right)}{\pi \left((f_d - f_c - f_b + f_a) \frac{T}{2} + \Delta f_1 \tau \right)} \end{aligned} \quad (6)$$

令 $c = (f_d - f_c - f_b + f_a)$, 当 $f_c = f_b$ 时, $c = 2\Delta f$; 当 $f_c > f_b$ 时, $c = 2\Delta f + a$; 当 $f_c < f_b$ 时, $c = 2\Delta f - a$ 。

从式(6)可知,互相关产生的 sinc 函数中心点会随信号扫描起止频率的变化关系而产生时移,而开展 3 个激振器构成的可控震源地震勘探

的地震子波是由自相关函数 $\frac{A^2}{2} \frac{T \sin \pi \Delta f \tau}{\pi \Delta f \tau} \cos 2\pi \cdot \left[f_0 + \frac{\Delta f}{2T} \right] \tau$ 的主瓣形成的。因此,当 $f_c > f_b$ 时,

产生的 sinc 函数中心点已经超出了 $\frac{\sin\pi\Delta f\tau}{\pi\Delta f\tau}$ 的边界长度,互相关产生的主瓣不会出现在地震单炮记录中,即不会对主瓣产生干扰,而其他两种情况均会在相关过程中对地震相关子波的主瓣产生一定的干扰,式(4)中的 $A(t)$ 在相关过程中会产生多个互相关因子,在情况严重时甚至会产生“假层”,即在设计扫描过程中必须予以避免。

图 4 为扫描持续时间均为 1 s,3 个激振器扫描频率段分别为 40~130 Hz,120~210 Hz,200~270 Hz;40~120 Hz,120~200 Hz,200~280 Hz;40~110 Hz,120~190 Hz,200~270 Hz 时的相关结果。

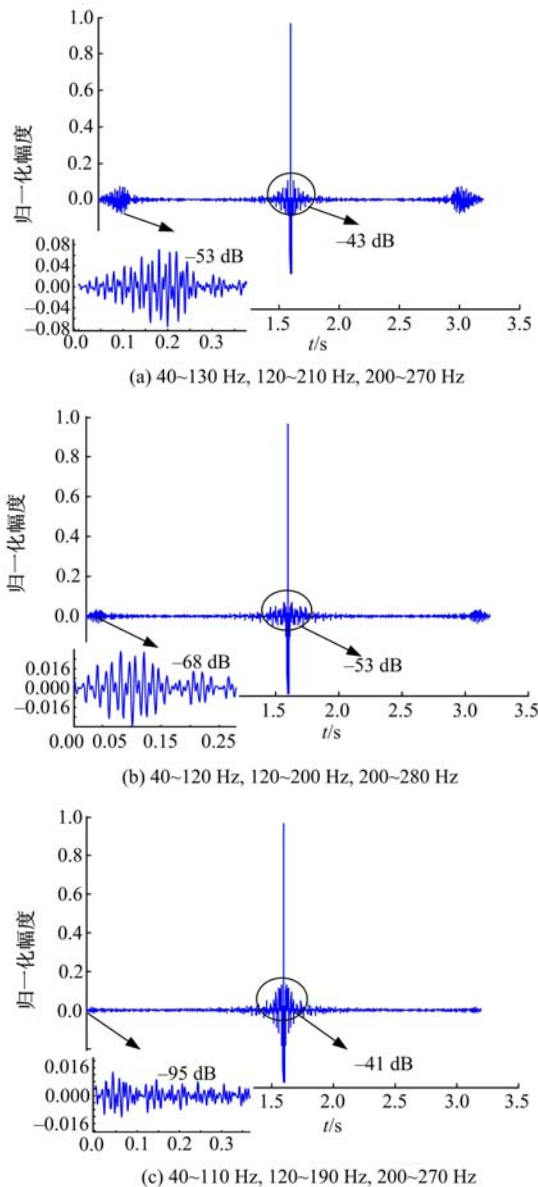


图 4 相关结果

Fig. 4 Correlation result

图 4 证明了互相关理论推导结果,3 个激振器不同的扫描频率段之间的交错关系会对相关时延估计后的地震子波产生影响。主瓣是由 3 个扫描频率段自相关产生的,将互相关结果对于主瓣的影响压制到最小,采用图 4(c)中的扫描频率段方式,即 3 个激振器同时扫描,各个扫描频率段之间有一定间隔的扫描方式,将扫描时间控制在 1 s 内,使得地震勘探工作载体行进速度对于相关子波的影响可以忽略不计。从仿真图形中可以看出,自相关结果很理想,产生的相关噪声达到 -95 dB,远远小于前两种情况,满足海洋震源地震勘探的要求。

3 实验结果

在实际测试中,采用实验室自主研发的海洋电磁式可控震源和振动控制单元进行地震波的激发,GEI2006 地震仪采集系统作为地震数据采集器进行地震波形采集。根据上述扫描方式,研制了一种满足上述扫描信号输出的信号发生器:通过单片机控制独立的三通道 DDS 芯片 AD9852,信号发生器产生频率、相位以及幅度可控的可控震源扫描信号。

使用加速度传感器采集 3 个电磁激振器振动叠加信号,通过软件将信号相关处理得到地震子波,当 3 个激振器扫描频率段为:40~100 Hz、90~150 Hz、140~200 Hz,扫描持续时间为 1 s,叠加相关后的图形如图 5 所示。

然后,使三个激振器扫描频率段为:40~80 Hz、90~130 Hz、140~180 Hz,扫描持续时间为 1 s,叠加相关后的图形如图 6 所示。

以上测试结果表明,文中描述的短时频率分

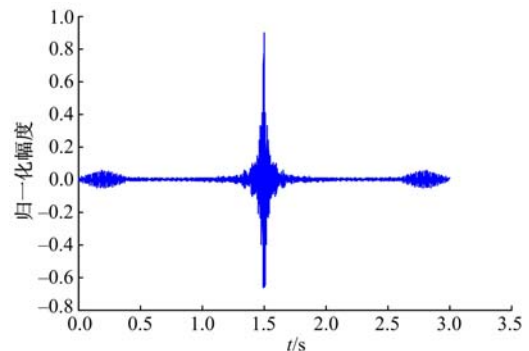


图 5 扫描频率段分别为 40~100 Hz、90~150 Hz、140~200 Hz 时的相关结果

Fig. 5 Correlation result with frequency segment: 40~100 Hz,90~150 Hz,140~200 Hz

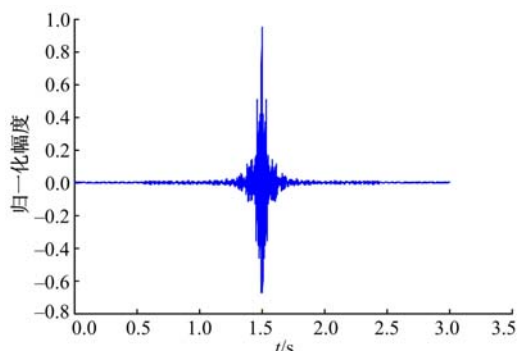


图 6 扫描频率段分别为 40~80 Hz、90~130 Hz、140~180 Hz 时的相关结果
Fig. 6 Correlation result with frequency segment: 40~80 Hz, 90~130 Hz, 140~180 Hz

段扫描方式通过高频电磁式激振器结合震源-海水耦合结构在新研制的海洋可控震源上可以完全实现,不会出现以往扫描方式受制于震源机械结构频率响应的现象^[15],进而为高分辨率海洋地震勘探的实施提供了一种可行的震源装备。

4 结束语

通过对陆地电磁式可控震源扫描方式的研究,根据海洋电磁式可控震源自身的工作特性,提出了一种短时分段扫描方式,并在计算机上进行仿真得到了最适合短时分段扫描方式的扫描频率段。通过相关后的主瓣信号主频以及因旁瓣信号构成的信噪比等指标证明了本扫描方式的可行性。在实际测试过程中,采用信号发生单元将三段 Chirp 扫描信号按预定的扫描方式,驱动海洋电磁式可控震源 3 个电磁激振器,得到了与计算机仿真一致的地震子波,证明了针对海洋地震勘探的工作特点,结合线性扫描、联合扫描和编码扫描三种工作方式所设计的短时分段扫描方式对于海洋电磁式可控震源的有效性。

参考文献:

[1] 何汉漪. 海上高分辨率地震技术及其应用[M]. 北京:地质出版社,2001.
[2] Robinson Charles L. How vibratory seismic work is

conducted offshore[J]. World Oil, 1967(5):594-597.
[3] Baeten Guido, Fokkema Tacob, Ziolkowski Anton. The marine vibrator source[J]. First Break, 1987, 6(9):285-294.
[4] Tenghamn Rune. An electrical marine vibrator with a flextensional shell: DECEMBER 2005 DRAFT[C] // AESC2006, Melbourne, Australia, 2006.
[5] Tenghamn Rune. PGS electrical marine vibrator[J]. Techlink, 2005, 5(11):1-3.
[6] 林君,陈祖斌. 电磁式大功率浅层地震可控震源系统[P]. 中国:01128147.2,2001.
[7] 林君. 电磁驱动可控震源地震勘探原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2004.
[8] 陈祖斌,林君. 可控震源扫描控制技术[J]. 计算机工程与应用,2002,38(7):241-243.
Chen Zu-bin, Lin Jun. Study on the control of vibroseis scanning signal[J]. Computer Engineering and Applications, 2002,38(7):241-243.
[9] 陈祖斌,林君,于生宝,等. 轻便浅层地震可控震源的研制[J]. 仪器仪表学报,2003,24(3):311-314.
Chen Zu-bin, Lin Jun, Yu Sheng-bao, et al. The development of portable shallow seismic vibrator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(3):311-314.
[10] Werner H, Krey T H. Combisweep—a contribution to sweep techniques[J]. Geophysical Prospecting, 1979,27:78-105.
[11] Edelmann H A K, Werner H. The encoded sweep technique for vibroseis[J]. Geophysics, 1982, 47(5):809-818.
[12] Peacock Berhardt T. Encoding technique for the vibroseis system[J]. Geophysical Prospecting, 1978, 26:184-193.
[13] Peacock, Berhardt T. Encoding technique for the vibroseis system[J]. Geophysical Prospecting, 1978, 26:184-193.
[14] Cunningcham A B. Some alternate vibrator signal[J]. Geophysics, 1979, 47(12):1901-1921.
[15] Chen Zu-bin, Teng Ji-wen, Lin Jun, et al. Nonlinear analysis on the coupling process of electromagnetic vibrator and earth[J]. Science in China Series D-Earth Sciences, 2005, 48(8):1175-1182.