文章编号:1673-5005(2012)02-0081-05

滑动扫描记录中压制谐波干扰方法

黄建平1,周学锋2,郭 军2,王方超3,石 飞2,李振春1

(1.中国石油大学 地球科学与技术学院、山东 青岛 266580; 2.中海石油(中国)有限公司天津分公司 勘探开发研究院、天津 300451; 3.中海油能源发展监督监理技术公司、天津 300451)

摘要:提出一种适用于滑动扫描的纯相移滤波方法。通过对记录或者统计得到的可控震源力信号进行分解,得到各 次谐波分量,然后通过对地震道记录按照各次谐波的相移量进行纯相移处理。对相移后的结果,设计合适的滤波 器,消除谐波。结果表明,所提方法稳定、高效、易于实现,只需要知道可控震源力信号和每一炮的初至时间,就可以 在滑动扫描记录中有效消除谐波干扰,适用于对野外采集数据进行实时处理。

关键词:地震资料处理:滑动扫描:谐波畸变:纯相移

中图分类号:P 315.31 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2012.02.013

Method of harmonic noise elimination in slip sweep data

HUANG Jian-ping¹, ZHOU Xue-feng², GUO Jun², WANG Fang-chao³, SHI Fei², LI Zhen-chun¹

(1. School of Georesources in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Tianjin Branch, Research Institute of Petroleum Exploration & Development in CNOOC Limited Company,

Tianjin 300451, China;

3. CNOOC EnerTech-Supervision & Technology Company, Tianjin 300451, China)

Abstract: A new method of eliminating harmonics for slip sweep recording was presented using the pure phase shift filter. The phase spectrum of each harmonic components from the ground force obtained by recording or statistics was computed. Then the procedure of pure phase shift operation was taken and a favorable filter was designed to eliminate the harmonics. The results show that this method is robust, fast and can be easily implemented. Using only the ground force and the start times of the sweeps, it can remove the harmonics in slip sweep data effectively, and it is applicable for real-time processing. Key words; seismic data processing; slip sweep; harmonic distortion; pure phase-shift

滑动扫描采集技术可以得到高密度炮点、高覆 盖次数的地震数据^[14],但采用滑动扫描采集的最大 问题是谐波干扰。以升频扫描为例,如果采用传统 的采集方式,通过相关处理就会把升频扫描产生的 谐波干扰移到记录的负时间轴区域,然后就可以在 零时间处进行切割,消除谐波干扰;而对于滑动扫描 记录,一段连续的记录包括若干个扫描,不同炮记录 在时间上部分叠加在一起,对后一炮进行相关时,谐 波干扰产生的噪声就会污染前一炮甚至前几炮的数 据。目前已经提出了多种消除谐波干扰的方法。一 种非常普遍的方法就是变相位扫描技术^[57],通过采 用具有不同相位的多次扫描,在采集过程中就可以 压制谐波,但是该方法实施起来比较困难,也很难对 其进行质量监控^[8]。Li等针对线性扫描方式,提出 了纯相移滤波方法^[9],可以有效压制近场和远场的 谐波畸变,但该方法是针对传统的单炮点采集提出 的,不适用于可控震源滑动扫描采集方式。针对滑 动扫描数据,Fleure 提出了一种在频率域分离谐波 进行压制的技术^[10];Meunier 提出了一种通过预测 谐波,然后在道记录中依次减去谐波的方法^[11-12]; Moerig 提出了一种通过对道记录进行相关,利用负 时间域的信号对前一炮进行谐波干扰估计,然后消

收稿日期:2011-08-08

基金项目:国家自然科学基金项目(41104069);山东省自然科学基金项目(ZR2011DQ016)

作者简介:黄建平(1981-),男(汉族),四川内江人,副教授,博士,主要从事地震波传播与正演模拟、地震成像研究。

除谐波的方法^[13]。笔者提出一种适用于滑动扫描 的纯相移滤波方法。该方法通过对记录或者统计得 到的可控震源力信号进行分解,得到各次谐波分量, 然后通过对地震道记录按照各次谐波的相移量进行 纯相移处理。对相移后的结果,设计合适的滤波器, 消除谐波。

1 谐波畸变扫描信号及其频谱分析

1.1 谐波畸变扫描信号分析

对谐波的理论分析主要基于 Sheriff 和 Li 等的 研究^{19.14]}。为了便于理解分析,这里采用线性升频 扫描方式。定义参考信号表达式为

$$s(t) = a_1(t) \exp[i2\pi ft], \qquad (1)$$

$$a_{1}(t) = \begin{cases} c, \ 0 \leq t \leq T, \\ 0, \ \pm \ell, \end{cases} f = f_{L} \frac{(f_{H} - f_{L})t}{T}.$$

式中,a₁为振幅包络;T为扫描时间;f为瞬时频率;f₁ 为起始频率;f₁为终止频率。根据参考信号与各次 谐波信号频率之间的关系,相应的各次谐波信号表 达式为

 $s_m(t) = a_m(t) \exp[i2\pi mft], m = 1, 2, \dots, M.$ (2) 当m = 1时, $s_m(t)$ 即为参考信号。谐波畸变扫描信 号可以分解为一系列谐波信号和参考信号的叠加, 因此定义谐波畸变扫描信号(HDS)为

$$s(t) = \sum_{m=1}^{n} a_{m}(t) \exp[i2\pi m f t], \ m = 1, 2, \cdots, M.$$
 (3)

从定义式可以看出,基波信号和所有阶次的谐 波信号 $s_m(t)$ 基本上是同时产生的,因此无法在时 间域来分离它们。不过,式(2)表明第m次谐波的 瞬时频率f是随着时间在 $(m+1)f_L \leq f(t) \leq (m+1)f_H$ 范围内线性变化的,关系表达式为

$$t_{m}(f) = \frac{\left(\frac{f}{m+1} - f_{L}\right)T}{f_{H} - f_{L}}, \ m = 1, 2, \cdots, M, \quad (4)$$

因此得到

t_{m+1}(f) < t_n(f) < t₁(f), m = 1,2,...,M. (5)
 这表明对于一个固定的瞬时频率,第 m 次谐波
 到达该频率的时间比第 m + 1 次谐波到达的时间要
 长,基波到达该频率的时间最长。

这里值得注意的是傅里叶频率f和瞬时频率f 是不同的概念,同理傅里叶相位谱和瞬时相位谱也 是不同的概念。瞬时频率f指的是一个信号在一个 时间点处的频率,而傅里叶频率f是跟信号的傅里 叶变换联系在一起的。但是,因为在这里考虑的是 线性扫描方式,所以本文中认为傅里叶频率和瞬时 频率是等价的^[9]。

1.2 谐波畸变扫描信号频谱分析

对谐波畸变信号 s(t) 作傅里叶变换,得

$$S(w) = |S(w)| \exp(-i\Phi(w)) = \sum_{m=1}^{M} |S_m(w)| \times \exp(-i\Phi_m(w)).$$
(6)

相位谱 $\Phi(w)$ 和 $\Phi_m(w)$ ($m = 1, 2, \dots, M$) 以及 振幅谱 | S(w) | 和 | $S_m(w)$ | ($m = 1, 2, \dots, M$) 通常不 能解析得到^[15]。由式(6) 得到谐波畸变信号的振 幅谱和相位谱分别为

$$|S(w)| = |S_{1}(w)| \sqrt{\hat{S}_{R}^{2}(w) + \hat{S}_{1}^{2}(w)} , \qquad (7)$$

$$\Phi(w) = \Phi_1(w) + \arctan[S_1(w)/S_R(w)]. \quad (8)$$

其中 $\hat{S}_{R}^{2}(w)$ 为实部,为 $\hat{S}_{1}^{2}(w)$ 虚部,表达式分別为 $\hat{S}_{R}(w) = \sum_{m=1}^{M} \frac{|S_{m}(w)|}{|S_{1}(w)|} \cos[\Phi_{m}(w) - \Phi_{1}(w)],$

$$\widehat{S}_{1}(w) = \sum_{m=1}^{M} \frac{|S_{m}(w)|}{|S_{1}(w)|} \sin[\Phi_{m}(w) - \Phi_{1}(w)].$$
(10)

从式(9)和式(10)可以看出 HDS 的振幅谱和 相位谱都会分别围绕相应的、未畸变的基波扫描信 号振幅谱和相位谱产生振荡。这种振荡的变化取决 于振幅比 $|S(w)/S_1(w)|$ 和相位差 $\Delta \Phi(w) =$ $|\Phi(w) - \Phi_1(w)|,随着谐波畸变振幅的增加,相位$ $谱<math>\Phi(w)$ 会大大偏离基波相位谱 $\Phi_1(w)$ 。通过数值 计算,证明相位谱存在如下关系:

2 滑动扫描纯相移滤波方法实现

谐波畸变扫描信号可以看成是基波信号和各次 谐波信号的线性叠加,因此谐波畸变信号的振幅谱和 相位谱也可以看成是基波信号与各次谐波信号的振 幅谱和和位谱的线性叠加。数值计算表明,基波信号 与各次谐波信号的相位谱是不同的,谐波的阶次越 高,对应的相位谱也越大,都大于基波的相位谱。

基于基波与各次谐波之间相位谱的关系,类似 于纯相移滤波器方法,依据可控震源高效采集数据 的特点,提出基于滑动扫描的纯相移滤波方法。该 方法通过依次选取 m(m = 2,3,…,M) 次谐波来分 (1) 计算纯相移滤波算子。对第 m(m = 2) 次 谐波信号进行傅里叶变换,将变换结果写为振幅谱 和相位谱的形式,即

 $S_m(f) = |S_m(f)| \exp[-\mathrm{i}\Phi_m(f)].$

令振幅谱 $|S_m(f)| = 1$,得到纯相移算子 $S_m^*(f) = exp[i\Phi_m(f)]$ 。针对纯相移算子,本文中认为该相 位谱本身即为反纯相移算子,其表达式为 $S'_m(f) = exp[-i\Phi_m(f)]$ 。

(2)应用纯相移算子,对地震道记录进行纯相移处理。将地震道记录 d(1)转换到频率域,对每一个频率分量进行纯相移处理,

 $D'(f) = D(f) S_m^*(f) ,$ $d'(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} D'(f) \exp(-i2\pi ft) dt.$

然后将处理结果进行傅里叶反变换,变回到时间 域。此时地震道记录中的m次谐波的谐波分量会在 时间轴上能量聚焦,形成一个极值。

(3)设置滤波器,进行滤波处理。通过选取合适的窗函数,设置相应的滤波器h(t),对步骤(2)得到的结果进行滤波处理,消除地震道中m次谐波的能量,然后将滤波结果变换到频率域。此过程中窗函数的选择非常重要,既要保证能够有效地消除谐波分量,又不能对有效信号造成过多的损害,同时还要注意避免引入额外的处理噪声。

d''(t) = d'(t)h(t), $D''(f) = \int_{-\infty}^{\infty} d''(t)\exp(i2\pi ft) dt.$

(4)应用反纯相移算子,进行反纯相移处理。
对 D''(f)应用反纯相移算子 S'_m(f),得到消除 m 次 谐波的结果。

改变m值,重复上述步骤,可以依次消除三次谐 波、四次谐波等各次谐波的能量。

3 方法验证

3.1 仿真信号处理验证

采用升频扫描信号,取M = 3,基波信号的起始 频率为10 Hz,终止频率为80 Hz,扫描时间为5 s,采 样间隔为0.001 s。其中振幅包络 $c_1 = 1.0, c_2 = 0.5$, c₃ = 0.2。由基波信号、二次谐波和三次谐波叠加生成谐波畸变扫描信号,如图1所示。



图1 谐波畸变信号生成过程

Fig. 1 Generation of harmonically distorted sweep

通过对谐波畸变扫描信号按照基波的相位谱进 行相移,可以看到,谐波成分都被相移到了负时间 轴,而基波能量在零时间位置聚焦,形成尖脉冲,如 图2(b)所示。对该结果进行滤波处理,分离出的基 波信号如图2(c)所示。与图2(d)理想基波信号的 对比表明,该方法可以较好地分离基波信号。同理, 通过该方法可以从谐波畸变信号中依次分离出各次 谐波信号。





3.2 实际数据处理

分别对滑动扫描数据和 V1 数据进行了处理。 V1 采集为滑动扫描的三维采集方式,即用多个震源 进行滑动扫描时,按照三维观测系统的设计,采用多 个排列进行接收。该数据均来自东方地球物理公 司。滑动扫描数据和 V1 数据的部分采集参数如表 1 所示。

表1	滑动扫描数据和 V1 数据采集参数
Table 1	Acquisition parameters of slip sweep
	and V1 data

采集 方式	扫描时 间 <i>T/</i> 8	记录时 间 <i>T</i> ,/ s	扫描 方式	扫描频 率 <i>f</i> _/ Hz	采样间 隔 <i>T</i> 。/ s	接收点 间隔 Δx/m
滑动扫描	12	7	线性	10 ~ 72	0.002	25
V1 采集	16	5	线性	5 ~ 80	0.004	25

对滑动扫描数据采集参数的分析表明,该数据 存在谐波畸变。图3为对其中某一单道记录数据进



图 3 单道记录频谱分析结果



行谐波分析的结果。从该图上可以看出:该记录存 在着明显的谐波干扰,表现为谐波分量的振幅围绕 基波信号的振幅上下跳动;从时频图上可以非常直 观地看出该记录中的谐波分量,表现为各谐波分量 的频率为基波信号频率的整数倍。图4是对该资料 某一单道记录数据处理前后的振幅谱。可以看出处 理前存在着强烈的谐波干扰,处理后谐波分量振幅 谱围绕基波信号振幅谱上下跳动的现象消失,表明 该方法能够有效地消除谐波干扰。图5是对单炮记 录的处理结果。可以看到处理前谐波干扰非常明 显,尤其是在近道数据中,由于初至能量非常强,对 有效信号造成了严重的污染,处理后效果比较明显, 清除了谐波干扰。同时本文中对 VI 数据进行了处 理,图6为对V1数据处理前后的效果比较。图5和 图6表明该方法在一定程度上消除了谐波干扰,提 高了资料的信噪比。







图 6 V1 数据处理的结果 Fig. 6 Processing results of V1 data

4 结束语

提出了一种新的去除滑动扫描地震数据中谐波 干扰的方法。该方法采用纯相移原理,只需要记录 各炮记录的震源力信号和初至时间,简单、稳定、高 效,易于实现。该方法既可以对切割的未相关单炮 记录进行处理,也可以为未切割的连续未相关记录 进行处理,运算效率较高,在实际数据处理中取得了 较好的效果,适用于对野外采集数据进行实时处理。

参考文献:

 魏国伟,张慕刚,魏铁,等.可控震源滑动扫描采集技 术方法及应用[J].石油地球物理勘探,2008,43(2): 67-70.
 WEI Guo-wei, ZHANG Mu-gang, WEI Tie, et al. Slidesweeping acquisition method of vibroseis and application

[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2008,43(2):67-70.

- RAS P, DALY M, BAETEN G, et al. Harmonic distortion in slip sweep records [C/OL]. Expanded Abstracts of SEG 69th Annual Meeting, 1999;609-612. [2011-02-05] http:// library. seg. org/getabs/servlet/GetabsServlet? prog = normal&id = SEGEAB000018000001000609000001&idtype = cvips&gifs=yes&ref=no.
- [3] ALLEN K P, JOHNSON M L, MAY J S, et al. High Fidelity Vibratory Seismic (HFVS) method for acquiring seismic data [C/OL]. Expanded Abstracts of SEG 68th Annual Meeting, 1998:140-143. [2011-02-08] http://library. seg. org/getabs/servlet/GetabsServlet? prog = normal&id = SEGEAB000017000001000140000001 & idtype

= cvips&gifs = yes&ref = no.

- [4] BAGAINI C. Overview of simultaneous Vibroseis acquisition methods [C/OL]. Expanded Abstracts of SEG 76th Annual Meeting, 2006:71-74. [2011-03-03] http://library.seg.org/ getabs/servlet/GetabsServlet? prog = normal&id = SEGE-AB000025000001000070000001&idtype = cvips&gifs = yes&ref = no.
- [5] 周学锋. 基于预测滤波的谐波干扰压制方法研究[D]. 青岛:中国石油大学地球资源与信息学院,2011. ZHOU Xue-feng. Method of harmonic noise elimination based on its estimation [D]. Qingdao: College of Geo-Resources and Information in China University of Petroleum(East China), 2011.
- [6] RIETSCH E. Reduction of harmonic distortion in vibratory source records [J]. Geaphys Prosp, 1981, 29:178-188.
- SCHRODT J K. Techniques for improving Vibroseis data
 [J]. Geophysics, 1987,52:469-482.
- [8] MARTIN J E, WHITE R E. Two methods for continuous monitoring of harmonic distortion in vibroseis signals [J]. Geophys Prospect, 1989,37:851-872.
- [9] MARTIN J E, BACON W M. Simultaneous vibroseis recording [J]. Geophys Prosp, 1993,41:943-967.
- [10] LI Xiao-ping, SOLLNER W, HUBRAL P. Elimination of harmonic distortion in vibroseis data [J]. Geophysics, 1995,60:503-516.
- [11] FLEURE T. Method of reducing interference while using overlapping source point seismic recording techniques U S, 6418079[P]. 2002-07-09.
- [12] MEUNIER J, BIANCHI T. Harmonic noise reduction opens the way for array size reduction in vibroseis operations [C/OL]. Expanded Abstracts of SEG 72th Annual Meeting, 2002; 70-73. [2011-03-04] http://library.seg. org/getabs/servlet/GetabsServlet? prog = normal&id = SEGEAB000021000001000070000001&idtype = cvips&gifs =yes&ref=no.
- [13] MEUNIER J, BIANCHI T. Method of reducing harmonic noise in vibroseis operations: U S, 6603707 [P]. 2003-08-05.
- [14] MOERIG R. Method of harmonic noise attenuation in correlated sweep data: U S, 260021 [P]. 2007-08-21.
- [15] SERIFF A J, KIM W H. The effect of harmonic distortion in the use of vibratory surface sources [J]. Geophysics, 1970,35:234-246.
- [16] BAETEN G, ZIOLKOWSKI. The vibroseis source [M]. Oxford: Elsevier Science Publication, 1990.
- [17] RIETSCH E. Computerized analysis of Vibroseis signal similarity [J]. Geophys Prosp, 1977,25:541-552.
 (编辑 修荣荣)