·采集技术·　　文章编号:1000-7210(2014)06-1048-05

数字光栅地震检波器的若干问题研究

徐从裕*　徐海侠　罗　洋　袁航周

(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院,安徽合肥 230009)

徐从裕,徐海侠,罗洋,袁航周. 数字光栅地震检波器的若干问题研究. 石油地球物理勘探,2014,49(6):1048-1052.

摘要　地震检波器的发展水平已成为衡量油气勘探能力的一个重要标志,以高分辨率和高动态范围著称的光栅地震检波器展示出了强劲的发展前景。针对目前光栅地震波探测研究中发现的影响分辨率和动态范围提高的难点,对数字光栅地震波探测中的若干问题进行了研究,提出了数字光栅信号的无失真采样和根据地震波采样数据对数字光栅误差进行同步分离的解决方法。仿真和实验数据均验证了上述方法的有效性,由数字光栅误差引入的地震波探测的谐波失真已经可以忽略不计。

关键词　数字光栅　地震波探测　采样方法　误差分离　谐波失真

中图分类号:P631　　**文献标识码**:A

1　引言

地震波探测方法及地震检波器的每一步发展与油气勘探技术的需求是密不可分的[1~3]。在经历常规模拟地震检波器之后,通过工艺的改进,发展到了超级地震检波器,目前这类地震检波器[4~8]依然在发挥着作用。随着油气勘探条件的变化,已有的常规模拟地震检波器或超级地震检波器在地震波探测频率范围、动态范围、分辨率及保真度方面已不能完全满足勘探的要求[9~11],进而推动了地震波探测新方法的研究,其中基于光栅测量的地震波探测方法[12,13]就是一种颇具发展前景的方法。

光栅地震波探测原理,本质上就是光栅莫尔条纹计数原理。由于光栅莫尔条纹信号在地震波的探测频率和动态范围内始终是等幅变化的正弦波和余弦波,不存在位移探测上限问题,其动态范围仅仅取决于检波器内部的弹簧线性变化区间和可感知的光栅信号分辨率。研究如何提高光栅地震波探测的分辨率和动态范围,就成为光栅地震波探测方法需要解决的关键技术问题。在光栅地震波探测研究领域,李淑清[13]进行了开拓性的研究工作,取得了地震波探测分辨率为 125nm,动态范围为 84dB 的研究成果,该研究成果已远远超过了模拟地震检波器的 60dB 左右的动态范围。但目前光栅地震波探测方法研究也面临着亟待解决的难点问题,正如李淑清[13]指出:莫尔条纹信号的正交性,直接影响着检测装置的动态范围和分辨率。此外,笔者认为光栅莫尔条纹信号的不等幅误差、直流误差等也是影响地震波探测的动态范围、分辨率和保真度的关键因素。地震检波器输出的光栅莫尔条纹信号,其信号质量除了与制造工艺、安装工艺等有关外,也受运输条件或放置条件的影响。现在的问题是:当光栅莫尔条纹信号误差已经存在时,如何从现场地震波探测信号中,直接将这种误差分离出来,则是光栅地震波探测方法研究中需要解决的又一关键技术问题。

本文针对目前光栅地震波探测存在的问题,从数字光栅地震波采样方法和数字光栅地震波误差分离两方面入手,研究提高数字光栅地震波探测性能的方法。

2　数字光栅地震波探测的若干问题

2.1　数字光栅地震波采样方法问题

基于数字光栅的地震波探测是通过光栅信号数

* 安徽省合肥市屯溪路 193 号 1 号信箱合肥工业大学仪器科学与光电工程学院,230009。Email:ahhf-xcy@163.com

本文于 2013 年 9 月 20 日收到,最终修改稿于 2014 年 9 月 16 日收到。

本项研究受安徽省自然科学基金项目(11040606M113)和中央高校基本科研业务费专项资金联合资助。

返回中文目录

字化进行的。目前的光栅信号数字化的计数值,包括应用于地震检波器的光栅信号数字化的计数值均由两部分组成(图 1),一部分是根据光栅辨向脉冲进行计数的大数计数值 N,另一部分是根据软件细分进行计数的小数计数值 Δn_1,光栅信号数字化的计数值是大数计数值与小数计数值之和,即 $N+\Delta n_1$。

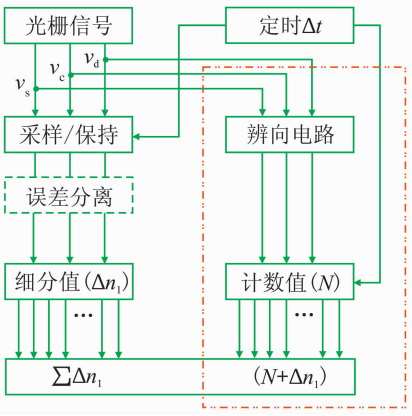


图 1　光栅测量原理框图

v_s、v_c、v_d 分别为光栅的正弦信号、余弦信号和直流偏置

由于光栅信号自身存在误差,则计数脉冲或通过硬件再次细分后的计数脉冲中包含有未知的误差,进而导致了地震波探测的误差加大以及非线性失真的加大。由计数脉冲引入的这部分误差和非线性失真,无法从光栅信号数字化的计数值中进行分离和修正。由此可见,上述光栅信号数字化的计数方法,对提高地震波探测的动态范围、分辨率,存在一个无法回避的由非线性转换所带来的大数计数误差的瓶颈问题,这个问题是光栅测量领域一直存在、有待解决的难点问题。因此,研究一种没有任何非线性转换环节的光栅信号数字化采样方法就显得尤为重要,是光栅应用于地震波探测需要考虑的首要问题。

2.2　数字光栅地震波误差分离问题

由于光栅信号自身存在误差,导致光栅信号数字化后的数据中包含有误差。如上所述,如果采用辨向脉冲计大数、软件细分计小数的方法,则数字光栅计数值中必然包含有未知的不可修正的误差,这将严重制约地震波探测分辨率和动态范围的提高。因此,将数字光栅应用于地震检波器中除了需要考虑数字光栅信号的采样方法外,还需要研究光栅信号数字化后的误差分离算法和修正方法。目前的高精度光栅测量装置,对光栅莫尔条纹信号的质量要求极高。对于像计量光栅测试这样的应用领域,可以通过对光栅制作工艺的改进及对测量电路参数的严格筛选等手段来满足高精度的测量要求。而对于像油气勘探的应用领域,光栅地震检波器用量很大,少则数千只,多则数万只,如果为每一只光栅地震检波器中的光栅和每一套光栅测量电路参数进行配对和筛选,不仅成本难于承受,而且也不现实。若在实验室为每一只光栅地震检波器中的数字光栅误差进行标定,并将标定值列表与每一只地震检波器一一对应,不仅任务繁重,而且可能会出现差错。此外地震检波器由于运输问题及放置条件变化,数字光栅信号误差也可能发生变化,原先标定的数据也会出现误差或失效。因此,研究一种根据现场地震波的采样数据同步对数字光栅信号误差进行分离和修正的算法和方法,就显得尤为重要,这也是光栅检波器用于地震波探测时需要考虑的第二个问题。

3　采取的解决方法

3.1　光栅信号无失真采样的数字化测量方法

目前应用在地震检波器的光栅信号数字化误差主要存在辨向脉冲的计数值中,且是一种未知的不可修正误差。这是因为辨向脉冲是由光栅正弦信号和余弦信号通过非线性变换而来的,其辨向分辨率远远低于测量分辨率。设想如果能将辨向分辨率提高到测量分辨率同一量级上,则辨向误差完全可以由测量误差进行修正,进而解决了光栅信号数字化的失真采样问题。在前期的相关研究中,对辨向分辨率与测量分辨率的“同”与“不同”进行了研究。初步研究结果表明:在纳米级测量分辨率的量级上,如果采用硬件电路的非线性变换对光栅信号进行辨向,只能得到辨向分辨率与测量分辨率的“不同”;而如果将光栅信号辨向与测量在算法上统一,就可以得到辨向分辨率与测量分辨率的“同”。因此,统一的光栅信号辨向算法与测量算法是实现“光栅信号无失真采样的数字化测量方法”的关键技术。

光栅信号是由光栅正弦信号 $v_s=R\sin\varphi$ 和光栅余弦信号 $v_c=R\cos\varphi$ 组成,其中 R 和 φ 分别为光栅信号幅值和相位。光栅信号的细分本质就是将光栅正弦信号和光栅余弦信号之间存在的正交相位差

返回中文目录

(90°)均匀等分,因此光栅细分信号可以表示为:$u_i=R\sin(\varphi-i\theta)$,其中的 θ 为细分角,$\theta=90°/M$,M 为一个象限内的细分数,当 i 从 0 变到 M 时,光栅细分信号就由开始的光栅正弦信号 $v_s=R\sin\varphi$ 等角度地变化到光栅余弦信号 $v_c=R\cos\varphi$。

将光栅细分信号 $u_i=R\sin(\varphi-i\theta)$ 和 $u_{i+M}=R\sin[\varphi-(i+M)\theta]$ 展开可得

$$u_i=k_{1i}\times v_s-k_{2i}\times v_c \tag{1}$$

$$u_{i+M}=-k_{1i}\times v_s-k_{2i}\times v_c \tag{2}$$

式中:$k_{1i}=\dfrac{1}{\sqrt{1+\mathrm{tg}^2(i\theta)}}$;$k_{2i}=\dfrac{\mathrm{tg}(i\theta)}{\sqrt{1+\mathrm{tg}^2(i\theta)}}$。

式(1)和式(2)为本文采用的光栅信号辨向与测量算法[14],对应于图 1 虚框外所示的部分。光栅信号通过线性采样及数字化后直接进行细分,细分值 Δn_1 中包含有完整的辨向信息和测量信息。光栅信号数字化后的计数值为所有细分值之和,即 $\sum\Delta n_1$。细分值 $\Delta n_1=m-n$,m 和 n 为光栅信号相邻两个采样值满足式(1)或式(2)过零的 i 值。在光栅信号采样周期内,式(1)或式(2)仅有一式满足过零条件。

从式(1)和式(2)中已看不出哪一部分属于辨向算法、哪一部分属于测量算法。

需要指出的是,光栅信号并非理想信号,总会存在正交误差、幅值误差和直流误差,这些误差的存在直接影响到地震波探测分辨率和动态范围的提高,因此在光栅信号细分前,需要先对非理想光栅信号中的误差进行分离。

3.2 基于单变量递推的数字光栅误差分离方法

数字光栅误差是由多个误差项组成,且相互之间存在很强的耦合性。以往的误差分离方法多采用针对单个误差项的分离,这样的分离方法会导致多误差项分离值之间的相互影响;另一种误差分离方法采用多元二次拟合方程对多误差项进行递推分离,这种分离方法有可能会出现递推过程不收敛的问题,且误差分离不彻底。本文采用笔者前期所做的研究成果[15],即将多元二次拟合方程解耦为一元一次误差分离方程组,通过内外递推,实现光栅信号多误差项的无偏差分离,且具有递推速度快的特点。

包含有误差项的光栅信号可表示为

$$v_s=R/K_c\times\sin(\varphi+\alpha)+V_s \tag{3}$$

$$v_c=R\times\cos\varphi+V_c \tag{4}$$

误差修正后的信号可表示为

$$v'_s=\frac{K_c(v_s-V_s)-(v_c-V_c)\sin\alpha}{\cos\alpha} \tag{5}$$

$$v'_c=v_c-V_c \tag{6}$$

其中:α 为正交误差项;K_c 为幅值误差项;V_s 和 V_c 为直流误差项。误差修正后的光栅信号满足 $v'_s=R\sin\varphi$,$v'_c=R\cos\varphi$。

将式(5)和式(6)两边平方后再相加,可得

$$R^2=\left[\frac{K_c(v_s-V_s)-(v_c-V_c)\sin\alpha}{\cos\alpha}\right]^2+(v_c-V_c)^2 \tag{7}$$

将 i 和 j 时刻的光栅信号采样值 v_{si}、v_{ci} 和 v_{sj}、v_{cj} 分别代入式(7),由于李沙育圆半径 R 保持不变,则有

$$\left[\frac{K_c(v_{si}-V_{si})-(v_{ci}-V_{ci})\sin\alpha}{\cos\alpha}\right]^2+(v_{ci}-V_{ci})^2=\left[\frac{K_c(v_{sj}-V_{sj})-(v_{cj}-V_{cj})\sin\alpha}{\cos\alpha}\right]^2+(v_{cj}-V_{cj})^2 \tag{8}$$

式(8)包含有 K_c、V_s、V_c、α 四种误差项。为便于求解,在式(8)中仅保留一个误差项,就得到如下误差项递推表达式

$$K_{ck}=\left(-\frac{v_{ci}^2-v_{cj}^2}{v_{si}^2-v_{sj}^2}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{9}$$

$$V_{sk}=0.5\times\frac{v_{si}^2-v_{sj}^2+v_{ci}^2-v_{cj}^2}{v_{si}-v_{sj}} \tag{10}$$

$$V_{ck}=0.5\times\frac{v_{si}^2-v_{sj}^2+v_{ci}^2-v_{cj}^2}{v_{ci}-v_{cj}} \tag{11}$$

$$\alpha_k=\arcsin\left(0.5\times\frac{v_{si}^2-v_{sj}^2+v_{ci}^2-v_{cj}^2}{v_{si}\times v_{ci}-v_{sj}\times v_{cj}}\right) \tag{12}$$

式(9)~式(12)就是本文采用的单变量误差分离算式。其中:K_{ck}、V_{sk}、V_{ck}、α_k 不是最终误差值,而是中间递推值。上述分离算式与式(5)和式(6)结合起来,通过递推就能实现光栅信号的误差分离,具体过程见文献[15]。

4 实验结果

图 2 显示了数字光栅误差分离前和误差分离后对地震波探测的影响,其中的误差分离方法是本文所述的基于单变量递推式的数字光栅误差分离方法。图 3a 为采用光栅构建的地震波探测实验装置图,图 3b 为在 80Hz 振动频率下获取的光栅信号波形图,图 3c 和图 3d 分别为数字光栅误差分离前和分离后对应的李沙育圆。

返回中文目录

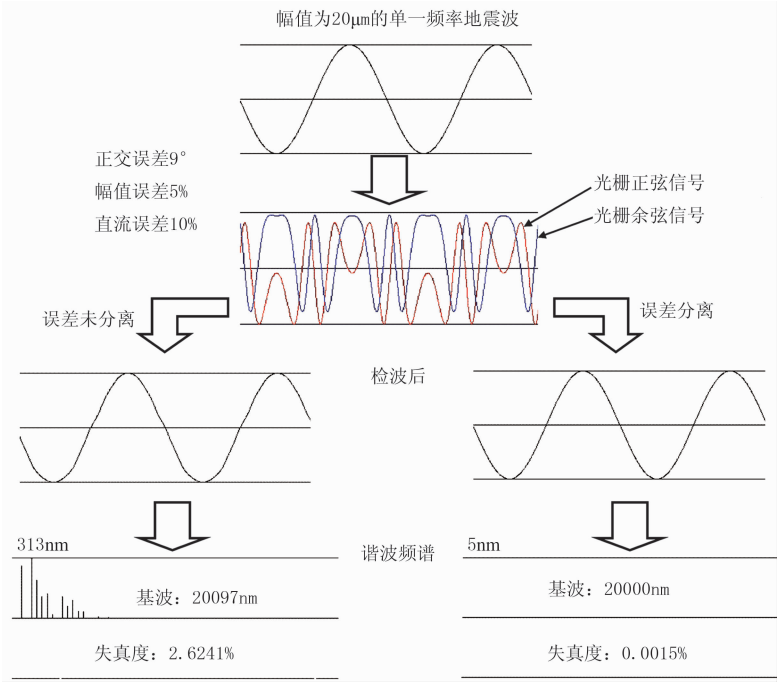


图 2　数字光栅误差对地震波探测的影响

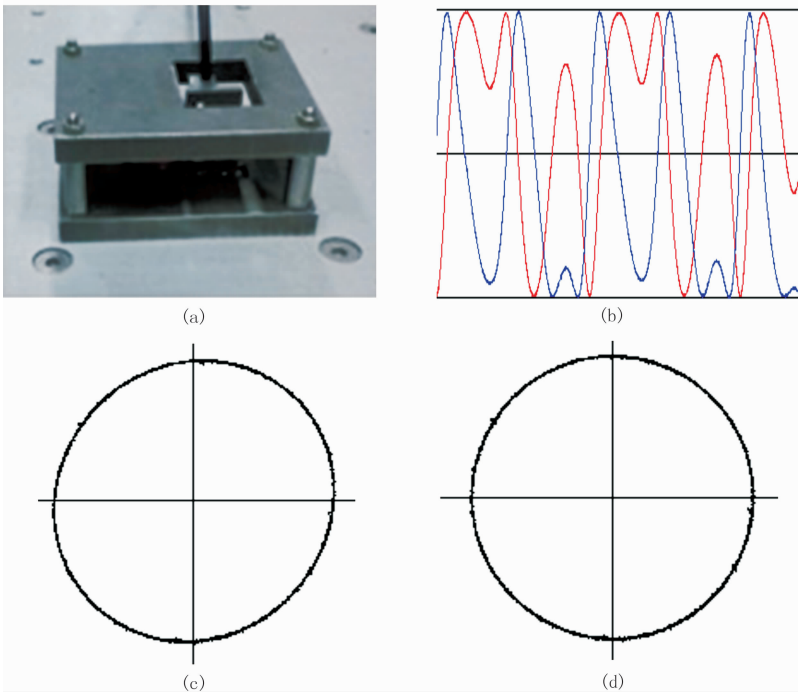


图 3　实测的光栅信号波形图和对应的李沙育圆

(a)探测实验装置；(b)光栅信号波形(红色和蓝色分别为光栅正、余弦信号)；(c)误差分离前；(d)误差分离后

由图 2 可以看出,当数字光栅误差存在时,产生的谐波失真容易造成对地震波探测的干扰,特别是对微弱高频地震波探测的干扰。对于有 9°的正交误差、5%的幅值误差和 10%的直流误差的单频光栅信号而言,如果不进行误差分离,其产生的谐波失真度就高达 2.6%;当采用本文所述的采样方法和误差分离方法后,其残余的谐波失真度已经可以忽略不计了。

图 3 显示了对于采用光栅构建的光栅地震波探测实验装置,其数字光栅误差总是存在的、也是无法

返回中文目录

避免的，将这种误差从地震波探测数据中分离出来也正是本文的目的之一。

5 结论

本文从数字光栅信号采样和数字光栅误差分离两个方面，探讨和研究了提高数字光栅地震波探测性能的措施和方法，提出的光栅信号无失真采样的数字化测量方法和基于单变量递推式的数字光栅误差分离方法，基本上消除了由数字光栅误差引入的谐波干扰对地震波探测的影响问题，同时为高分辨率和大动态范围的地震波探测提供了一种解决途径和实现方法。

参 考 文 献

[1] 罗福龙. 地震仪器技术新进展. 石油仪器，2012，26(1)：1-5.
Luo Fulong. New progress of seismic instrument. Petroleum Instruments，2012，26(1)：1-5.

[2] 刘振武，撒利明，董世泰等. 地震数据采集核心装备现状及发展方向. 石油地球物理勘探，2014，48(4)：663-675.
Liu Zhenwu，Sa Liming，Dong Shitai et al. The present situation and developing direction of seismic data acquisition core equipment. OGP，2014，48(4)：663-675.

[3] 赵波，王赟，芦俊. 多分量地震勘探技术新进展及关键问题探讨. 石油地球物理勘探，2012，47(3)：506-516.
Zhao Bo，Wang Yun，Lu Jun. Multi-component seismic exploration technology progress and key issues discussed. OGP，2012，47(3)：506-516.

[4] 傅朝奎，唐建人，李勤学. 利用联合组合效应提高地震资料的信噪比和分辨率. 石油地球物理勘探，2000，35(2)：236-243.
Fu Chaokui，Tang Jianren，Li Qinxue. To improve seismic data signal-to-noise ratio and resolution using combined with composite effect. OGP，2000，35(2)：236-243.

[5] 李庆忠，魏继东. 论检波器横向拉开组合的重要性. 石油地球物理勘探，2007，42(4)：375-382.
Li Qingzhong，Wei Jidong. Discussing the importance of detector horizontal pull combination. OGP，2007，42(4)：375-382.

[6] 薛斌，黄峰，段亚玲. 地震检波器中磁体的发展及特点. 物探装备，2009，19(5)：288-294.
Xue Bing，Huang Feng，Duan Yaling. The development and characteristic of the permanent magnet in seismic geophone. EGP，2009，19(5)：288-294.

[7] 罗福龙. 组合检波器的响应特性及效果试验. 石油地球物理勘探，2012，47(2)：194-201.
Luo Fulong. The combination of detector response characteristics and effect test. OGP，2012，47(2)：194-201.

[8] 王增明. 地震采集中检波器自然频率的试验分析. 石油地球物理勘探，2003，38(3)：222-225.
Wang Zengming. Test and analysis of the natural frequency of geophone seismic acquisition. OGP，2003，38(3)：222-225.

[9] Shelton J. Accelerometers，geophones and seismometers-which to choose. Acoustics Bulletin，2012，37(4)：19-20.

[10] Hauer G，Hons M S，Stewart R R et al. Laboratory comparison of the performance of analog geophones and MEMS accelerometers. 70th EAGE Conference and Exhibition，2008，217-221.

[11] Hons M S，Stewart R R，Lawton D C et al. Field data comparisons of MEMS accelerometers and analog geophones. The Leading Edge，2008，27(7)：896-903.

[12] 李淑清，王冠雅，刘庆葵. 基于莫尔条纹倍增技术的非对称光栅地震检波器的理论研究. 物探设备，2007，17(1)：14-17.
Li Shuqing，Wang Guanya and Liu Qingkui. Theoretical research of unsymmetrical grating seismic geophone based on the Moire fringe multiplication technology. EGP，2007，17(1)：14-17.

[13] 李淑清. 光栅谐振子检测地震波的理论和方法研究[博士学位论文]. 天津：天津大学，2009.

[14] 徐从裕，余晓芬. 基于互补函数算式的光栅快速细分方法. 电子测量与仪器学报，2006，20(3)：6-9.
Xu Congyu and Yu Xiaofen. A method of fast grating subdivision based on formula of mutual compensation functions. Journal of Electronic Measurement and Instrument，2006，20(3)：6-9.

[15] 徐从裕. 单变量递推法莫尔条纹信号误差分离算法. 仪器仪表学报，2012，33(8)：1708-1713.
Xu Congyu. Separation algorithm for Moiré fringe signal errors based on single-variable recursive method. Chinese Journal of Scientific Instrument，2012，33(8)：1708-1713.

（本文编辑：宜明理）

作 者 简 介



徐从裕 教授，1960 年生；1982 年本科毕业于合肥工业大学无线电技术专业，2008 年博士毕业于合肥工业大学测试计量技术及仪器专业；现在合肥工业大学仪器科学与光电工程学院主要从事精密测量与仪器智能化的研究。

返回中文目录