

浅层地震勘探数据拟同步采集时差分析与实践

朱德兵, 平利姣, 朱自强
(中南大学 信息物理工程学院, 长沙 410083)

摘要 理想的地震勘探数据采集,其硬件系统采用多道同步方式实现,保证多路信号的时间或相位一致性.理论时差分析表明,就地震信号的初至时刻来看,多路同步采集系统也存在系统误差.浅层地震勘探数据记录道数少,采用单个A/D模数转换器件通过逻辑系统控制实现少量地震道的多路循环分时采集,在满足采样定理所需采样频率和不增加地震信号初至系统误差的前提下,可以较少的硬件成本实现浅层地震信号的有效采集,这种采集方式我们称之为有效拟同步采集;通过实践证明了其采集方式的有效性.

关键词 浅层地震勘探, 系统误差, 同步采集, 分时采集

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)06-1958-05

Analysis of time difference in quasi-synchronous acquisition of shallow seismic data and its practice

ZHU De-bing, PING Li-jiao, ZHU Zi-qiang

(Central South University, School of Info-physics and Geomatics Engineering, Changsha 410083, China)

Abstract The data acquisition of ideal seismic survey is often realized by its hardware system using the multi-channel synchronous mode to keep time-consistency of multi-channel signal. Theoretical analysis of the time difference shows that the multi-channel synchronous acquisition system also has system errors in the pick of first arrive. The channel number of shallow seismic prospecting is not large, so we can use a logic system to control a signal A/D to collecting data channel by channel. It can realize data acquisition effectively with less hardware cost in the condition that the sample frequency satisfying the sampling theorem and not increasing the system error. This data acquisition mode is called effective pseudo-synchronous acquisition. Its validity has been validated by practice.

Keywords shallow seismic prospecting, system error, synchronous acquisition, time-sharing acquisition

0 引言

浅层地震勘探是工程物探的主要方法之一,被广泛应用于工程勘探^[1~3].现代浅层地震勘探仪器和油气地震勘探系统一样,为了保证信号采集的时间精度,普遍采用多路同步采集模式,在硬件系统的实现方式上,通过独立的信号模拟通道和独立的A/D转换器件实现多路信号的调理和模数转换.由于采集系统采用了等地震道数的A/D元器件,从而使该部分硬件系统的成本无法减小.而从数据采集本身来看,浅层地震勘探的地震信号频率一般在

1000 Hz 范围内,需要的单道数据采样频率数倍于地震信号的频率,即可保证有效信号不被泄漏^[4,5].如此一来,单个A/D元器件所具备的高采样率功能就被大大浪费.能否通过单个A/D实现多路信号的分时采集,地震勘探技术人员通常不愿意去考虑.

本文针对地震信号采集系统的系统时差问题,对比同步采集和分时采集系统,论证了两种采集系统的可比性和多路同步分时采集系统的合理性,并通过一套A/D采集系统对分布采集方式进行了实践,获得了原始数据采集记录.

收稿日期 2008-03-25, 修回日期 2008-09-07.

基金项目 湖南省交通厅重大科研项目公路隧道掘进突发地质灾害预警与评价技术研究项目(200624)资助.

作者简介 朱德兵,男,1968年生,副教授,博士,主要从事浅层地球物理技术研究.(E-mail:zhudbing@mail.csu.edu.cn)

*通讯作者 平利姣,女,1985年生,地球探测与信息技术硕士研究生.(E-mail:pinglijiao@yahoo.com.cn)

1 同步采集与分布采集理论误差

1.1 基于取样定理的模拟信号保真采集

数据采集涉及到模拟信号到数字信号的转换,根据采样定理,当取样频率 f_s 不小于输入模拟信号频谱中最高频率 f_{max} 的两倍,即 $f_s \geq 2f_{max}$ 时,取样信号 v_s 才可以正确反映输入信号,或者说在满足上式条件下,将 v_s 通过低通滤波器,就可使它无失真的还原成输入模拟信号 v_1 ^[6]. 在实际系统中,一般取 $f_s = (2.5-3)f_{max}$,便可以达到要求.

浅层地震勘探的地震记录道一般为 12 道、24 道或 48 道,作为多路同步采集,采样间隔 250 μs ,即采样率 4 kHz,可满足千赫兹信号的保真采集^[1]. 就采样频率来说,如果用单个 A/D 实现分时采集,24 道地震仪,A/D 采样间隔为 10 μs ,48 道地震仪,A/D 采样间隔为 5 μs ,采用多道循环采集,即可以满足每道 240 μs 的采样间隔要求,从而保证采集系统对信号的保真采集.

对于多路分时循环采集系统采集记录,通过多路时差的系统校正后,剩下的主要问题是地震波到达时间能否满足精度要求.

1.2 多路分时采集系统采集方式

多路分时采集系统采集方式主要是通过硬件来实现.

多路震动响应信号通各自检波器进入等数量相互独立的模拟信号调理电路,等待 A/D 的模数转换,整个模数转换通过一个高采样频率的 A/D 来完成,该 A/D 通过时钟控制来分频给每个模拟信号道,每采集完某道的一个数据即刻调整到下一个模拟通道,如此循环采集,完成等地震记录道数的模数转换,一次循环完成后即刻又重新回到第一个采样通道进行重新循环,直至完成所要采集的记录长度,其数据排列如图 1 所示.可以看出该 A/D 所完成的模数转换工作量是多路同步采集中所有 A/D 的工

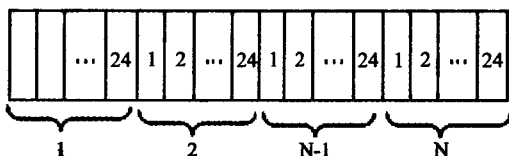


图 1 独立 A/D24 道分时采集数据排列
(N:单道数据长度)

Fig. 1 Data array of 24 channels Time-sharing Acquisition using self-governed A/D
(N: Data length of single channel)

作量.对于本来就具备高频采集性能的 A/D,其作业效率能得到充分发挥.

其采集方式决定其原始记录存在时间延迟^[7],由于采集存在延迟,而记录时忽略了延时,效果是初至时刻比实际的初至提前,因此在资料处理之前需先进行时差校正,加上各道对应的延迟时间,得到校正后时刻.假设采样间隔为 dt ,相邻道的时间延迟为 Δt ,采样通道数为 n ,记录中的初至为 t_i ,各道相对于第一道的延迟 δt_i 用表示,那么有:

$$\delta t_i = \Delta t \cdot (i - 1), \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

其中

$$\Delta t = dt/n, \quad (2)$$

加上各道对应延时校正后的其初至时间 τ_i 为:

$$\tau_i = t_i + \delta t_i \quad (3)$$

2 采集系统误差对比分析

检波器拾取震动信号,采集系统完成对检波器输入模拟信号的离散采集,除了基于采样定理的信号保真外,仪器记录的到达信号不能出现相位延迟或超前现象.不失一般性,初至时刻的精度可以代表信号延迟或超前的误差程度.

多路同步采集系统应该不存在信号的相位延迟现象,理论上说是正确的,这也是业内共识.但实际采集过程中,由信号旅程和速度所确定的旅行时并非精确地落到采样点上,位于不同空间位置的采样信号也并非完全相同^[8],也就是说,不同通道之间本身就存在相差问题.实践过程中必然存在相位系统误差,基于多路同步采集和分时采集所带来的系统误差是相当的.

2.1 系统时差的产生

为了便于初至系统时差的分析,我们用 24 路多道同步采集系统和等道数的多路分时系统来进行分析对比.初至波在地震记录上表现为较强的能量值^[9],研究时用子波来模拟震动源,选取的模拟子波函数为单一频率的衰减振动信号:

$$y = A \sin 2\pi f t e^{-\lambda t} \quad (4)$$

其中,A 为信号振幅, f 为频率,分析时取频率 $f = 500$ Hz, λ 为信号衰减系数,该信号初始震动的时刻取为零,其起跳明显.此函数选取不同于初至拾取预处理^[10]中选取小波,本模拟为明确表达拾取时产生的系统误差而非着重于初至的预处理,采用(4)式中函数能更直观表达系统时差的产生.给定偏移距后,我们从直达波和反射波检取的初至时刻来鉴别信号采样系统误差.其函数波形如图 2 所示.

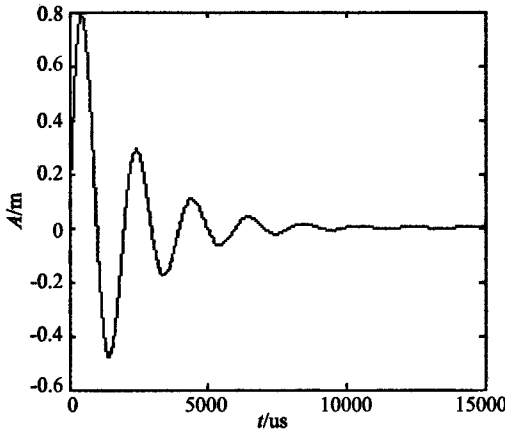


图2 地震子波函数

Fig. 2 The function of seismic wavelet

对于直达波,设各个记录道上的初至时间为 $t_i (i=1, 2, \dots, 24)$, 从 t_i 的表达式: $t_i = x_i/v$ 可知: 当 t_i 正好是采样间隔 dt 的整数倍时,初至时刻的零点位于一个采样点上,初至时刻此时没有误差;但遗憾的是 t_i 等于 dt 的整数倍是要碰机会的,因此绝大多数情况下,实际到达某个检波器的直达波初至不卡在采样整数点位上,这样就给信号的初至带来了系统误差。

图2是震源发出振动信号到达某道检波器,检波器检取初始到达信号的一个很小时间段,理想振动信号和离散采样信号在图上作了明确的对比。

图3中,实线为“连续”的地震子波波形, k 处其初始震动位置。虚线为以 dt 为采样间隔获得的离散数据及点画线采集信号波形,黑点代表采样点。

由信号旅程和速度所确定的旅行时并非精确地落到采样点上,图3中初始振动 k 处落在采样点3

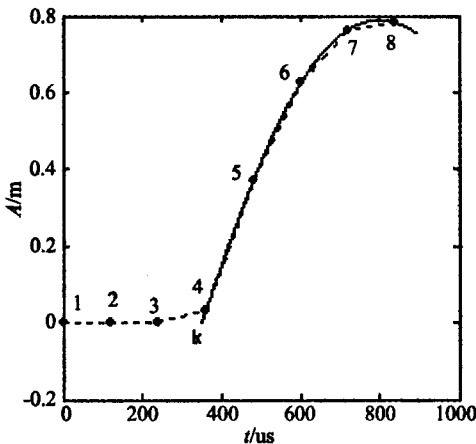


图3 初至识别的示意图

Fig. 3 Sketch of first pick

和4之间,根据采样数据将认为3为初至时刻.因此离散信号的初至和理想的初至存在时差即系统误差,如图所示不考虑延时,真正的初至在采样的零点之后会,故对于同步采集而言,误差范围为 $-dt \sim 0$, 对于分时采集而言,经过时差校正后的误差范围将为 $-dt \sim dt$.

从离散信号和理想连续信号的其它点对比来看,离散的信号在整个采集数据上都或多或少地存在局限,如8号离散点,如果正好落在理想信号的极大值点即特征点上,离散信号最为理想,而事实并非如此,这一缺憾只能通过后期数字信号处理来进行补偿。

2.2 直达波法的系统时差分析

实际获取的地震记录,初至时刻可能是直达波也可能是折射波,理论时距曲线中二者均是直线,只是斜率不同,因此分析直达波的系统时差便具有代表性。

直达波时距曲线方程为:

$$t = x/v, \tag{5}$$

式中 x 为炮检距, v 为上层介质速度。

在模拟计算中需要涉及以下公式进行计算:

同步采集初至时刻为:

$$t1 = dt \cdot \text{floor}\left(\frac{x10^6}{vdt}\right), \tag{6}$$

其中 $\text{floor}()$ 为向下取整数函数. 分时采集初至时刻为:

$$t2 = dt \cdot \text{floor}\left(\frac{x10^6}{vdt}\right) + \Delta t \frac{x-m}{dx}, \tag{7}$$

也可以写成

$$t2 = t1 + \Delta t \frac{x-m}{dx}, \tag{8}$$

同步采集误差:

$$\epsilon1 = t1 - t, \tag{9}$$

分时采集误差:

$$\epsilon2 = t2 - t. \tag{10}$$

式中 x 为炮检距, v 为波在介质中传播速度, dt 为采样间隔, Δt 为分时采集的相邻道延迟时间, m 为偏移距, dx 为道间距。

系统误差分析时同时结合标准误差对两种采集方式进行分析比较. 标准误差定义为各测量值误差的平方和的平均值的平方根,故又称为均方根误差. 设 n 个测量值的误差为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$, 则这组测量值的标准误差 σ 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \dots + \epsilon_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum \epsilon_i^2}{n}} \tag{11}$$

根据上述公式计算各道的时差,绘制时差随炮检距变化曲线如图4所示,并计算标准误差 σ_1 、 σ_2 。

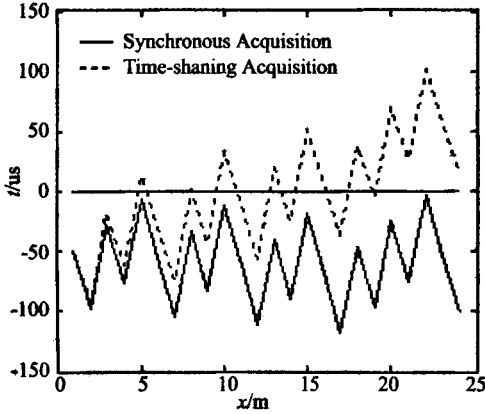


图4 直达波法误差与炮检距关系
Fig. 4 System errors and offset curves of direct wave method

图4中偏移距 m 为1 m,道间距 dx 为1 m,数据采集通道数 n 为24,地震波速度 v 为1300 m/s,采样间隔 dt 为120 μ s,误差范围为 -120μ s \sim 120 μ s.同步采集的标准误差 σ_1 为69.4043,分时采集的标准误差 σ_2 为47.5621。

同步采集和分时采集的系统时差在理论零点附近上下波动(范围和采样间隔 dt 相关: $-dt \sim dt$),同步采集时差为负,分时采集则有正有负.曲线形态也会因选取速度 v 、采样间隔 dt 及偏移距 m 、道间距 dx 的不同而有不同的表现形式,但变化总趋势是一致的;误差的绝对值控制在 dt 范围内;一般来说,在速度一定的介质中,距离越大,两种采集方式相对误差就越小.多次改变参数计算表明,标准误差有时是同步采集大,有时是分时采集大,二者的值相当.即对于直达波的初至拾取来说,同步采集和分时采集的系统误差和标准误差相当。

2.3 反射波法的系统时差分析

在反射波法的资料处理中,要根据时距曲线分析复杂的地下状况,间接涉及到初至的拾取.反射波法的时距曲线方程^[11]为:

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + h^2}}{V}, \quad (12)$$

式中 t 为初至时间, x 为炮检距, h 为界面的法向深度, V 为地震波在介质中的传播速度。

类比直达波分析算法,可以计算各炮检距 x 上

对应的时差,并求出标准误差,同时绘制出误差随炮检距变化曲线如图5所示。

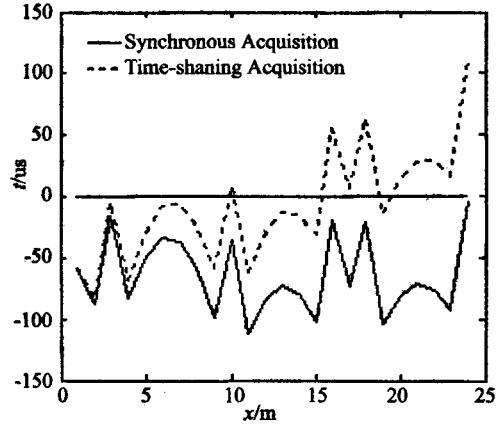


图5 反射波法误差与炮检距关系
Fig. 5 System errors and offset curves of reflected wave method

图5中偏移距 m 为1 m,道间距 dx 为1 m,数据采集通道数 n 为24,地震波速度 v 为1300 m/s,采样间隔 dt 为120 μ s,界面的法向深度 h 为20 m,误差范围为 -120μ s \sim 120 μ s.同步采集的标准误差 σ_1 为71.3420,分时采集的标准误差 σ_2 为44.7341。

类似于直达波,系统时差在理论零点附近上下波动,同步采集误差均为负,分时采集则有正有负.并且曲线形态也会因选取速度 V 、采样间隔 dt 及偏移距 m 、道间距 dx 及界面法向深度 h 的不同而有不同的表现形式.多次改变参数计算也表明,同步采集和分时采集的系统误差相当,标准误差无规律,有时同步采集大,有时分时采集大,数值上相当。

3 实践的验证

系统时差的分析是在介质以及信号都比较理想的条件下进行的,两者是相当的.实际的野外数据采集条件要远远复杂,但可以肯定的是,不论采用何种采集方式,系统时差的最大值也就是 dt 。

基于同步采集和拟同步采集的可比性,我们用一个多道分时采集卡实现了多路地震信号的同步采集,采集卡的A/D采样频率为200 KHz,由24个地震信号通道去分频采集,采样间隔为120 μ s。

图6(a)即是采用多道分时式采集系统所得野外实际数据的原始波形图,图6(b)为进行初至拾取后绘制出的实际的时距曲线。

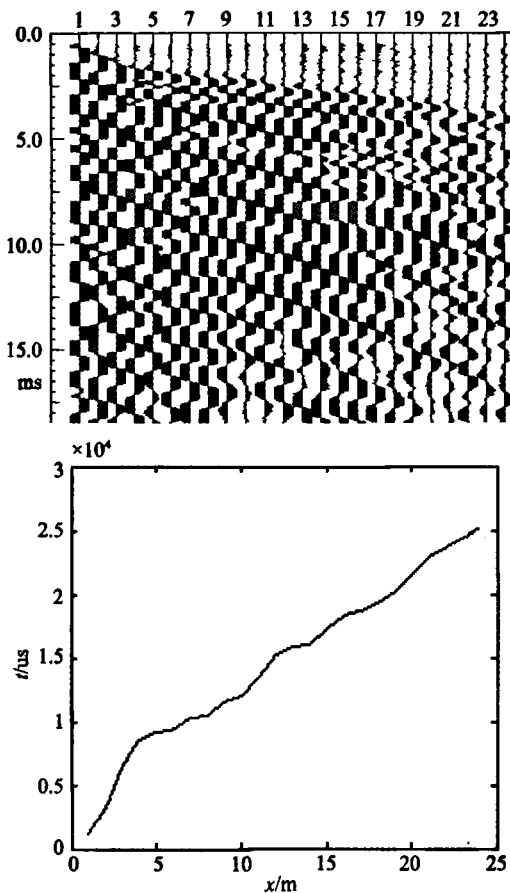


图6 (a)分时采集实际波形图, (b)初至波时距曲线

Fig. 6 (a) Actual waveform of time-sharing acquisition, (b) Time curve of first arrival

装置参数:锤击震源,偏移距1 m,道间距1 m.

试验地点表层为覆盖土层,下层为风化基岩(砂岩)。

实践表明,多路分时采集系统在浅层地震勘探中能够获得较好地数据采集记录,初至波起跳明显,便于识别,必然为后续资料解释提供合格的数据。

4 结 语

理论时差分析表明,在采样率和采样通道数相同的条件下,多路分时式采集系统经过时差校正后,其系统时差、标准误差与多路同步采集系统是相当的,两种采集方式都能满足采样定理,证明了分布式采集的可行性;野外的实践也证明了分时采集完全可以实现数据的实际采集。

因此,浅层地震勘探数据记录道数少,采用多路分时式采集系统可以用一个A/D模数转换器件实现多路模拟信号的拟同步采集,节省了A/D转换器件的数量,达到了和同步采集相近的效果。

对于两种方式的采集系统,应该继续就采集信

号进行全对比分析。该研究需要两套采集系统在模拟信号电路和A/D元件参数上也具有可比性,相应的工作还在进行中。

参 考 文 献 (References):

- [1] 陈相府,安西峰,王高伟. 浅层高分辨地震勘探在采空区勘测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2): 437~439.
Chen X F, An X F, Wang G W. Application of high-resolution seismic detecting for undermined shallow strata[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(2): 437~439.
- [2] 李庆春,刘金兰,丁梁波. 浅层双分量地震在黄土公路地质缺陷探测中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(4): 1266~1271.
Li Q C, Liu J L, Ding L B. Application of shallow multicomponent seismic to geological defects detecting in loess highway [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(4): 1266~1271.
- [3] 陈相府,安西峰. 地震横波勘探及其在浅层岩土分层中的应用[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5): 1655~1659.
Chen X F, An X F. Application of seismic shear wave detection in dividing shallow strata of rock and soil[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(5): 1655~1659.
- [4] 张在陆. 工程地震仪器认识上的误区[J]. 石油仪器, 2004, 14(6): 1~3.
Zhang Z L. Some misunderstanding in shallow seismograph. Petroleum Instruments[J]. 2004, 14(6): 1~3.
- [5] 张在陆. 数据采集系统信号混叠的研究[J]. 石油仪器, 1998, 12(1).
Zhang Z L. Discussion on the Signal Aliasing Phenomenon in Data Acquisition System[J]. Petroleum Instruments, 1998, 12(1).
- [6] 陈明义,覃爱娜,陈革辉. 数字电子技术基础(电类)[M]. 中南大学出版社. 2004. 358~360.
Chen M Y, Tan A N, Chen G H. Fundamentals of digital electronic technology (electricity)[M]. Central South University Press, 2004, 358~360.
- [7] 潘中印,黄健,张忠娅,等. 地震仪器数据采集同步技术[J]. 物探装备, 2006, 16(3): 165~167.
Pan Z Y, Huang J, Zhang Z Y, et al. Simultaneous data acquisition of seismograph[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2006, 16(3): 165~167.
- [8] 罗兰兵,董世学. 地震数据采集系统延迟时研究与分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35: 62~65.
Luo L B, Dong S X. Study and analysis of delay time of seismic acquisition system[J]. Journal of Jiling University (Earth Science Edition), 2005, 35: 62~65.
- [9] 潘树林,高磊,邹强,等. 一种实现初至波自动拾取的方法[J]. 石油物探, 2005, 44(2): 163~166.
Pan S L, Gao L, Zou Q, et al. An automatic method to pick up the first break time[J]. Geophysical Prospecting For Petrole(in Chinese), 2005, 44(2): 163~166.
- [10] 詹毅,唐湘蓉,钟本善. 初至拾取预处理[J]. 石油物探, 2005, 44(2): 160~162.
Zhan Y, Tang X R, Zhong B S. Preprocessing of picking first arrival in complex situation[J]. Geophysical Prospecting For Petrole(in Chinese), 2005, 44(2): 160~162.
- [11] 何德登. 地震勘探原理和方法[M]. 地质出版社. 1985.
HE Q D. Principles and methods of seismic exploration[M]. Geological Publishing House. 1985.