

11-17

中国数字地震台网数字化地震数据的仿真处理

何少林 郭永霞

(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

李海亮

(国家地震局地球物理研究所, 北京 100081)

p 315.63

摘要 对中国数字地震台网记录的宽带数字化地震数据进行了仿真处理,即将记录映射成多种传统窄带地震仪(SK, DK-1, DD-2 和 763 等)的记录,并通过与实际记录的比较联合解释了模拟记录和仿真数字记录.分析结果证实了仿真技术在数字化地震数据处理中的有效性和可行性,从而为仿真技术的进一步应用提供了依据.

主题词: 数字仿真 差分法 地震数据 数字化地震台网

1 引言

由于新技术的广泛应用,地震观测已提高到以数字记录为特征的新阶段.数字记录系统动态范围大、频带宽、精度高,且易于计算机分析处理,但由于其系统特性与现今大量使用的各种传统模拟记录系统的特性不同,因而联合解释它们的记录并充分利用已有的经验就显得很有必要,仿真处理正是联系这二者的有效手段.通过仿真生成特定地震仪的记录既满足不同的研究需要又加深了对二者的认识,另外,仿真还可生成在我国现在还没有的地震仪的记录.仿真处理的优点是:只用一套合适的数字记录可仿真得到多种地震仪的记录,且进行一次仿真处理的准备工作量比对实际物理系统进行研究的工作量要小,而且周期短,所需费用少.仿真处理可以完成或替代常规地震仪的工作,而且其输出稳定准确,可以利用其高精度的输出开展其它方面的研究.

2 中国数字地震台网简介

中国数字地震台网(简称 CDSN)中台站数据记录频带的地动速度响应特性如图 1 所示.各频段采样率短周期(SP)为 40 点/秒,宽频带(BB)为 20 点/秒,长周期(LP)为 1 点/秒^①.采用短周期 DJ-1 型地震计和宽频带 STS-1 型地震计作为传感系统,BB 信号由地震计的速度输出端引出,LP 信号由加速度输出端引出.

3 仿真处理的原理及应用

3.1 仿真处理的原理

本文 1996 年 12 月 24 日收到.

第一作者简介:何少林,男,1965 年 4 月生,助理研究员,从事台网数据处理工作.

①CDSN 用户学习班讲义.

仿真,概括地说,就是对一个实际物理系统的性质进行模仿,又分为物理仿真和计算机仿真两种.物理仿真过程是用一个物理模型来模仿实际系统,计算机仿真则是用计算机对实际系统进行模仿,即将实际系统的运动规律用数学公式表达出来,它通常是一组微分方程或差分方程,然后用计算机来求解这些方程.由于计算机技术的发展,计算机仿真越来越多地取代了纯物理仿真,计算机仿真的过程可大致分为4个步骤^[2]:

- (1) 写出实际系统的数学模型;
- (2) 将数学模型变成能在计算机上运转的仿真模型;
- (3) 编制仿真程序;
- (4) 对仿真模型进行修改、校验及分析.

地震数据的仿真处理就是将给定的地震仪记录映射成另一个地震仪记录,是地震信号反卷积和正卷积的过程,即地震记录经过地震仪的反卷积复原为真实地动信号,再经过特定地震仪正卷积得到仿真的特定地震仪的记录.

3.2 仿真处理的应用

3.2.1 原始数据的选取

在作仿真处理时,要求原始记录系统频带宽,具有稳定明确的传递函数,被仿真的地震仪系统传递函数也应明确、稳定.因此,本文选用 CDSN 系统中北京台的短周期(SP)信道和中周期(BB)信道作为原始记录,选用该台的基式地震仪(SK)、763 型地震仪、DD-2 型仪和 DK-1 型仪作为被仿真的地震仪系统,分别对选定的地震事件进行仿真处理.因是同一台站的两种记录形式,在比较结果及分析时,可以不考虑震源及路径因素的影响,其差别只受记录系统仪器特性的影响.

3.2.2 传递函数的变换

通常对于具体地震记录系统,已知的只是其在模拟域中的传递函数,要实现计算机仿真,首先要将模拟域的传递函数变换为离散域(数字域)中的传递函数^[3].

3.2.2.1 连续域(s域)中地震记录系统传递函数的幅频响应

对于 SP 和 BB 信道,其幅频响应

$$H(s) = A_0 \cdot \prod_{m=1}^n (s - Z_m) / \prod_{n=1}^n (s - P_n) \quad (1)$$

其中 A_0 为常数因子, Z_m 为零点值, P_n 为极点值^②.

基式地震仪(SK)是正向连接的中长周期电流计记录电动式地震仪^[4],768 仪为反向连接的长周期电流计记录电动式地震仪^[4],它们的传递函数的幅频响应分别为

$$H_{sk}(s) = -V_0 \frac{2\omega_{ge} D_{ge} \cdot s^3}{(s^2 + 2\omega_{se} D_{se} \cdot s + \omega_{se}^2)(s^2 + 2\omega_{ge} D_{ge} \cdot s + \omega_{ge}^2)} \quad (2)$$

$$H_{763}(s) = -V_0 \frac{2\omega_{se} D_{se} \cdot s^3}{(s^2 + 2\omega_{se} D_{se} \cdot s + \omega_{se}^2)(s^2 + 2\omega_{ge} D_{ge} \cdot s + \omega_{ge}^2)} \quad (3)$$

其中 V_0 为静态放大倍数, $\omega_{ge} = \frac{2\pi}{T_{ge}}$, $\omega_{se} = \frac{2\pi}{T_{se}}$.

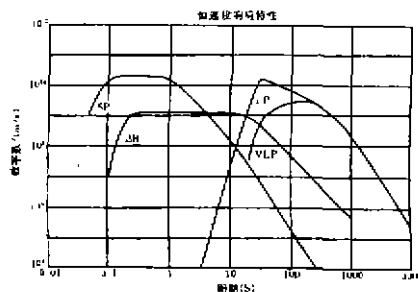


图1 CDSN 台站数据记录频带^[1]

Fig.1 Recording frequency range of CDSN station.

② 戴恒昌编著,地震观测 CDSN 地震数据文件的格式及使用方法.

DD-2 型短周期地震仪和 DK-1 型地震仪是电子放大笔绘记录电动式地震仪^[4], 其传递函数的幅频响应

$$H(s) = V_{os} \cdot V_{on} \cdot V_{or} \cdot \omega_s \cdot \omega_a \cdot \omega_r \quad (4)$$

式中 $V_{os}\omega_s(s)$, $V_{on}\omega_a(s)$ 和 $V_{or}\omega_r(s)$ 分别是地震计、放大器和记录笔的传递函数, 其中

$$\omega_s(s) = -s^3 / (s^2 + 2\omega_s D_s \cdot s + \omega_s^2),$$

$$\omega_r(s) = \omega_r^2 / (s^2 + 2\omega_r D_r \cdot s + \omega_r^2),$$

$$\omega_a(s) = (a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3) / (1 + b_1 s + b_2 s^2 + b_3 s^3).$$

以上几种常规地震仪中, 只有电流计记录地震仪的运动方程比较明确, 因而可得到较精确的传递函数, 对电子放大笔绘记录仪, 尤其是其中的放大器部分的表达式仅仅是根据实测的幅频和相频响应数据(曲线)拟合而成, 且不是唯一准确的形式。

上面各式中, 令 $s = j\omega$, 则可得到连续域(s 域)中地震记录系统的幅频响应曲线。

3.2.2.2 离散域(Z 域)中地震记录系统传递函数的幅频响应

首先计算从连续域到离散域的变换, 然后计算在离散域中的幅频响应。从连续域到离散域可采用双线性变换法^[5], 它是由系统频率响应设计数字滤波器的最佳方法。使用变换法的条件是离散域频率响应和模拟域频率响应一致。

双线性变换的公式为:

$$s = \frac{2}{T} (z - 1) / (z + 1) \quad (5)$$

相应的频率变换公式为:

$$\omega_a = \frac{2}{T} \operatorname{tg}(\frac{\omega_d T}{2}) \quad \text{或} \quad T_a = T \cdot \pi / \operatorname{tg}(T \cdot \pi / T_d) \quad (6)$$

式中 ω_a , T_a 是模拟域中的角频率和周期; ω_d , T_d 是数字域中的角频率和周期。

双线性变换不产生频率重叠现象, 但引入了一个非线性频率畸变, 即双线性变换把在无限区间内的模拟滤波器的频率响应映射到数字滤波器中, 是从直流到 f_0 的有限段, 且 $f_0 = f_s/2$, (f_s 为采样频率), 但对常用的几种地震仪(SK, 763, DD-2, DK-1 等) 是频率范围有限的滤波器, 且 CDSN 的采样率 f_s 是仪器最大频率 $f_{\max}$ 的两倍, 因此, 在记录仪的主频段内将得到最佳的双线性变换效果, 不同的只是高频部分(即在高频部分产生频率畸变)。双线性变换的另一优点是, 可以在未变换之前先将原型模拟传递函数进行分解, 既可降低高阶系统变换的复杂计算又可减小迭代误差。对于一般的系统, 其传递函数可分解为下面形式的多项式的乘积:

$$H(s) = H_0(s) \cdot H_1(s) \cdot H_2(s) \cdot H_3(s) \cdot H_4(s) \quad (7)$$

$$\text{相应地} \quad H(z) = H_0(z) \cdot H_1(z) \cdot H_2(z) \cdot H_3(z) \cdot H_4(z) \quad (8)$$

其中 $H_0(s) = V \cdot s^n$

$$H_1(s) = \prod_i \frac{s^2 + A(i) \cdot s + B(i)}{s^2 + C(i) \cdot s + D(i)} \quad H_2(s) = \prod_i \frac{F(i)}{s^2 + E(i) \cdot s + F(i)}$$

$$H_3(s) = \prod_i \frac{G(i)}{s + G(i)} \quad H_4(s) = \prod_i \frac{s + P(i)}{s + Q(i)}$$

$$\text{相应地} \quad H_0(z) = U \left(\frac{z - 1.0}{z + 1.0} \right)^n$$

$$H_1(z) = \prod_i \frac{C_0(i) \cdot z^2 + C_1(i) \cdot z + C_2(i)}{z^2 + D_1(i) \cdot z + D_2(i)} \quad H_2(z) = \prod_i \frac{O(i)(z^2 + 2.0 \cdot z + 1.0)}{z^2 + F_1(i) \cdot z + F_2(i)}$$

$$H_3(z) = \prod_i \frac{G_1(i)(z + 1.0)}{z + G_2(i)} \quad H_4(z) = \prod_i \frac{Q_1(i) \cdot z + Q_2(i)}{Q_3(i) \cdot z + Q_4(i)}$$

根据(7)式和(8)式可计算出在离散域中系统的传递函数 $H(Z)$, 又

$$z = e^{j\omega T} = \cos(\omega T) + j \sin(\omega T) \quad (9)$$

将(9)式代入(8)式可得到在离散域(z 域)中系统的幅频响应.

3.2.3 差分方程的分解及仿真的实现

考虑到计算机有限字长效应及积累误差的影响, 可将整个系统的差分方程分解为二阶和(或)一阶形式的乘积, 即相当于级联形式实现差分方程, 因为量化误差对于级联形式的影响要比直接形式小得多^[5].

对一个系统, 设输入为 $X(t)$, 输出为 $Y(t)$,

则 连续域内 时域 $Y(t) = X(t) * h(t)$

频域 $Y(s) = X(s) \cdot H(s)$

其中 $h(t)$ 是系统的时间函数, $H(s)$ 是其传递函数;

离散域内 时域 $Y(n) = X(n) * h(n)$

频域 $Y(z) = X(z) \cdot H(z)$

在离散域中, 可用差分方程实现 Z 域中的表达式, 即:

$$\text{时移性} \quad Y(z) \cdot z^{-k} \Leftrightarrow Y(n-k) \quad (10)$$

当求出仿真系统在离散域中的传递函数 $H(Z)$ 后, 将其分解为低阶(二阶和/或一阶)的级联形式, 并利用(10)式实现差分处理, 即

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = H_0(z) \cdot H_1(z) \cdot H_2(z) \cdot H_3(z) \cdot H_4(z) \quad (11)$$

对二阶形式有

$$\frac{Y_{i+1}(z)}{Y_i(z)} = \frac{a_0 z^2 + a_1 z + a_2}{z^2 + b_1 z + b_2} \quad (12)$$

由(10)式可知

$$\begin{aligned} Y_{i+1}(n) = & a_0 Y_i(n) + a_1 Y_i(n-1) + a_2 Y_i(n-2) - \\ & - b_1 Y_{i+1}(n-1) - b_2 Y_{i+1}(n-2) \end{aligned} \quad (13)$$

对一阶形式有

$$\frac{Y_{i+1}(z)}{Y_i(z)} = \frac{d_0 z + d_1}{z + C_1} \quad (14)$$

由(10)式得

$$Y_{i+1}(n) = d_0 Y_i(n) + d_1 Y_i(n-1) - C_1 Y_{i+1}(n-1) \quad (15)$$

由差分方程的分解可知, $Y(z)/X(z)$ 总可以表示(12)式和(14)式的形式, 即 $Y(n)/X(n)$ 总可以表示(13)式和(15)式的差分形式, 利用递推关系可由 $X(n)$ 计算出 $Y(n)$, 即由仿真系统的数字输入序列得到仿真系统的数字输出序列, 实现仿真处理.

3.2.4 仿真处理结果

为了能直观地比较台站原始模拟记录波形与仿真处理所得到的波形, 选取了几个较远的强地震作为样本, 具体参数见表1.

为减小 CDSN 系统及外界因素产生的高频成分干扰, 保证变换的有效性, 可对原始数据进行低通滤波预处理. 构造一个6阶巴特沃斯低通滤波器, 截止频率取 5.0 Hz, 即

$$H(s) = \omega^0 / [(s - P_1)(s - P_2) \cdots (s - P_6)]$$

式中 $\omega = \frac{2}{T} \lg(\pi \cdot F \cdot T)$, F 为截止频率, T 为采样间隔.

表1 地震事件目录(选自北京台的记录结果)

序号	发震时刻(UTC)	震中位置		震中距 (度)	震级 M_s
		纬度	经度		
1	1988-08-10;04 h 38 min 25.4 s	10.32°S	160.69°E	66.6°	7.1
2	1988-08-10;13 h 11 min 20.2 s	14.86°S	167.57°E	72.5°	6.0
3	1989-05-03;05 h 53 min 00.3 s	30.09°N	99.50°E	17.6°	6.8

注: (1)表中的震中距是指相对北京台的距离.

(2)表中仅列出已处理的部分地震事件目录.

对北京台记录的上述三次地震的数据进行了仿真处理,其仿真波形、原始模拟记录波形及 CDSN 记录波形如图 2~图 5 所示.限于篇幅本文仅给出部分处理结果.

比较台站原始模拟记录波形和仿真生成的波形及 CDSN 的数字记录波形可知:

(1)对 SK 型、DK-1 型地震仪,仿真生成的波形与台站原始模拟记录波形在周期和振幅上几乎完全一致,而 CDSN 数字记录的回放波形与台站原始模拟记录波形之间相差较大,CDSN 的记录含有更高的频谱成分,即含有更丰富的地震信息,这是因为其记录频带较宽的缘故.

(2)对 DD-2 型地震仪,其仿真生成的波形与台站原始模拟记录波形在周期和振幅上也几乎一致,但有个别部位略有不同.考虑到频带分布,进行仿真处理时选择了 SP 信道记录.

(3)对 763 型地震仪,其仿真生成的波形与台站原始模拟记录波形周期分布一致,仅在振幅比例上略有差别,可能是常数因子的误差造成的.进行仿真处理时,选择了 BB 信道记录,而不是 LP 信道记录,这是考虑到对具体的地震,在发震初期的一段时间内,长周期波还未到达,主要成分是中长周期波.当选取的时间段较长,即出现了长周期波时,进行仿真处理时必须联合考虑 BB 和 LP 信道的记录.

4 讨论

(1)由于台站原始模拟记录图不完整,不能对一个地震的数字记录做所有窄带地震仪的仿真处理,但仅从所得的处理结果看,完全可以用一套宽带数字化记录仿真出各种不同频段窄带地震仪的记录.

(2)相对于模拟记录,数字化记录精度高,易于处理,且可以克服模拟系统中由于仪器本身性能影响造成的各种误差,如线条宽度造成的测量误差,滚筒转速不均造成的周

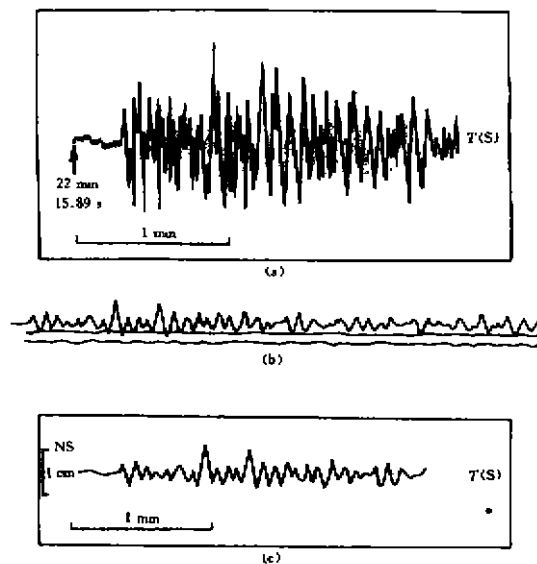


图2 No.2地震的仿真SK仪的结果

Fig.2 Simulation result by SK for the second earthquake.

(a) 原始 BB 记录波形; (b) 原始 SK 仪记录波形;
(c) 仿真 SK 仪记录波形

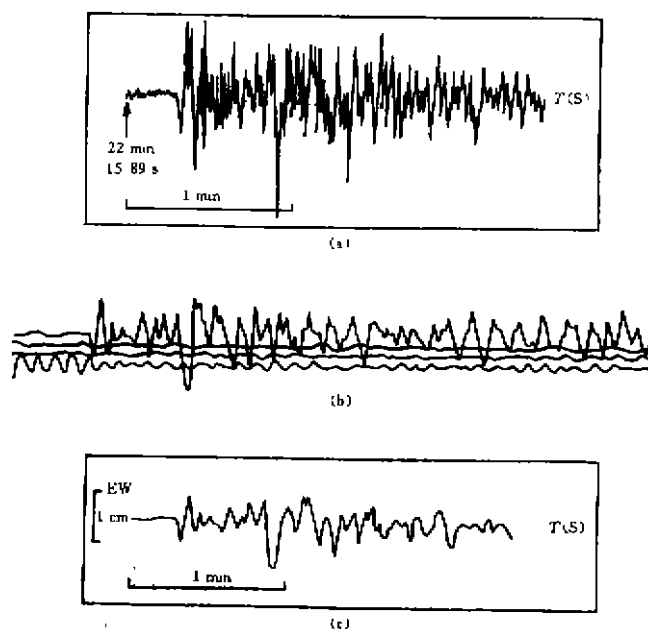


图3 No.2地震的仿真DK-1仪的结果

Fig.3 Simulation result by DK-1 for the second earthquake.

(a) 原始BB记录波形; (b) 原始DK-1仪记录波形; (c) 仿真DK-1仪记录波形

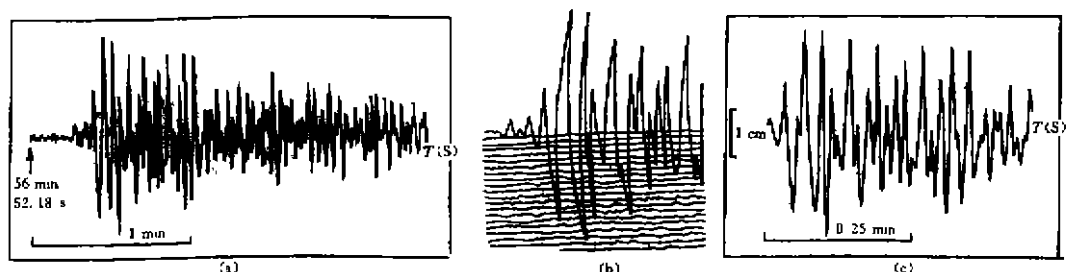


图4 No.3地震的仿真DD-2仪的结果

Fig.4 Simulation result by DD-2 for the third earthquake.

(a) 原始SP记录波形; (b) 原始DD-2仪记录波形; (c) 仿真DD-2仪记录波形

期误差,记录笔造成的记录弧线误差及零线误差等.

(3) 从更细微的比较看,SK和763仪的仿真记录的一致性比DD-2和DK-1仪仿真记录的要好,这是因为SK和763型仪是电流计记录地震仪,其系统的传递函数可精确地表达出来,因而能更准确地反映系统的响应特性,而DD-2、DK-1型仪属于电子放大式地震仪,其中电子部分的传递函数只是根据实测数据拟合而得,不准确且不唯一,因而影响了仿真结果.

(4) 在进行精确的仿真研究中,必须考虑仿真仪、被仿真仪和研究信号的频率覆盖关系,即研究信号的主频段应落在被仿真仪的主频段内,而被仿真仪的主频段要落在原始记录仪的主频段内.

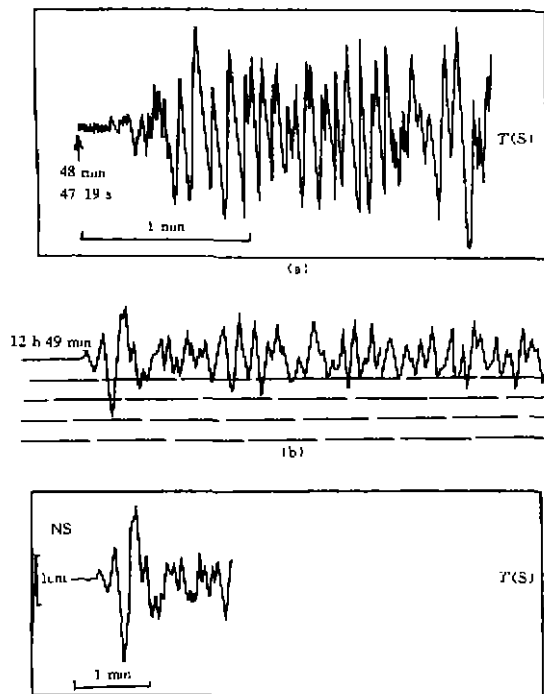


图5 No.1地震的仿真763仪的结果

Fig.5 Simulation result by 763 for the first earthquake.

- (a) 原始BB记录波形; (b) 原始76仪记录波形;
(c) 仿真763仪记录波形

总之,地震数据的仿真处理是完全合理可行的,相对模拟记录而言,其结果具有更高的精度,更重要的是可用一套宽带数字记录系统代替多种窄带模拟记录系统,仿真处理是联系数字记录 and 传统模拟记录的有效手段,还可利用其高质量的输出进行其它地震学方面的研究.

本工作得到了国家地震局数据中心赵仲和老师的悉心指导和帮助,在此表示衷心的感谢.

参考文献

- 1 王广福,周公威等编译.现代地震台网观测技术.北京:中国科学技术出版社,1986.
- 2 熊光榜.控制系统数字仿真.北京:清华大学出版社,1987.
- 3 Seidl D. The simulation problem for broad-band seismograms. *Journal of Geophysics*, 1980, 48:84~93.
- 4 王广福.地震观测系统的标定与检查.北京:地震出版社,1986.
- 5 郑君里,等.信号与系统.北京:高等教育出版社,1988.

THE SIMULATION PROCESSING OF CDSN DIGITAL SEISMIC DATA

HE Shaolin GUO Yongxia

(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000)

LI HaiLiang

(Institute of Geophysics, SSB, Beijing 100081)

Abstract

In this paper, the simulation processing of CDSN digital seismic data is introduced. The CDSN digital recordings are converted into many narrow-band recording modes such as SK, DK-1, DD-2, 763, etc.. The analogous and digital recordings are interpreted by comparing converted recordings with original recordings. The result shows that the simulation processing is effective and useful in the digital seismic data processing.

Key words: Numerical simulation, Differential method, Seismic data, Digital seismic network