

数字化噪声对强震记录的影响 及其消除方法*

谢礼立 钱渠杭 李沙白

(中国科学院工程力学研究所)

摘 要

本文详细地分析了强震加速度记录的数字化噪声。分析表明:数字化噪声由数字化设备的系统误差和操作者的随机读数误差迭加而成,随机数字化误差是具有各态历经性质的,其振幅按高斯规律分布的平稳随机过程,在其频谱组成中,长周期分量占明显的优势,因此将对二次积分加速度记录的位移曲线产生严重的影响。

研究表明:随机数字化“噪声位移”主要分布在周期大于25秒的频段,对加速度记录来说,分布在周期小于25秒的频段内,其随机噪声是相当小的(假定记录纸速为1厘米/秒)。因此,利用数字滤波技术,可以除去数字化加速度记录中的大部份随机数字化噪声。

作为实例,对一个典型的强震加速度记录进行了滤波,给出了低噪声的加速度记录和由此算出的位移曲线,且和未经滤波的相应记录及其位移进行了比较。

一、引 言

从强震加速度仪获得的记录大多数是连续平滑的曲线(数字加速度仪除外)。为了进行数字计算,必须先数字化,使它转换成相应的数字记录。

对模拟记录的数字化,一般是在半自动化的读数机上进行的。读数时,采用手动的十字游标跟踪记录迹线、通过模数转换器、把游标交点处的座标、转换成数字信号,以穿孔纸带或打印方式输出。

在模拟记录数字化的过程中,往往会引入对记录的数字分析有严重影响的误差。通常称为数字化噪声或数字化误差。M. D. Trifunac^[1] 第一个对这类噪声的性质进行了研究,并设法消除了这类噪声中对二次积分具有严重影响的长周期成分,从而比较圆满地解决了强震记录分析中,四十多年来一直未能解决的对加速度记录的二次积分问题。本文,按照 M. D. Trifunac 提出的方法,但采用了不同的实验装置和分析步骤,对数字化噪声进行了测定,并对这类噪声的性质、频谱特征以及传播规律进行了研究。数字化噪声是由数字化设备的系统误差和操作者的随机误差迭加而成,后者是一种振幅按高斯正态规律分布的,具有各态历经性质的平稳随机过程,而且在其频谱组成中,长周期分量占有明显的优势。最后,本文还利用数字滤波的方法,抑制了数字记录中的随机噪声,得到了低噪

* 1980年7月22日收到初稿,1982年3月收到修改稿。

声的加速度记录和相应的计算位移曲线, 并和未经滤波的(带有随机噪声的)加速度记录及其位移进行了比较。

二、数字化噪声的测定

在读数机(DT-206型)平台的对角线位置上安放一条直径约0.5毫米、被紧紧拉直的尼龙细线。测定时, 由七个人分别对此直线进行读数(读数长度约为60—70厘米)。其中一人重复读三次, 结果记为 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 ; 另一人重复读数二次, 结果记为 Z_4 、 Z_5 ; 其余五人分别读数一次, 结果分别记为 Z_6 、 Z_7 、 Z_8 、 Z_9 、 Z_{10} 。图1是将这些结果 Z_i ($i = 1, 2, \dots, 10$) 按最小均方法经过平移和旋转后得到的图形。图中的横坐标是以长度(厘米)为单位, 显然, 只要除以记录行走纸速, 就可以化为时间座标。图中的纵坐标是以bit为单位。若已知纵坐标的读数灵敏度为 b (本文选用 $b = 200 \text{ bit/厘米}$), 而加速度仪的记录灵敏度为 a 厘米/伽, 那么, 将纵坐标值除以 $(a \cdot b)$, 就可以把数字化噪声折算为相应的加速度值。

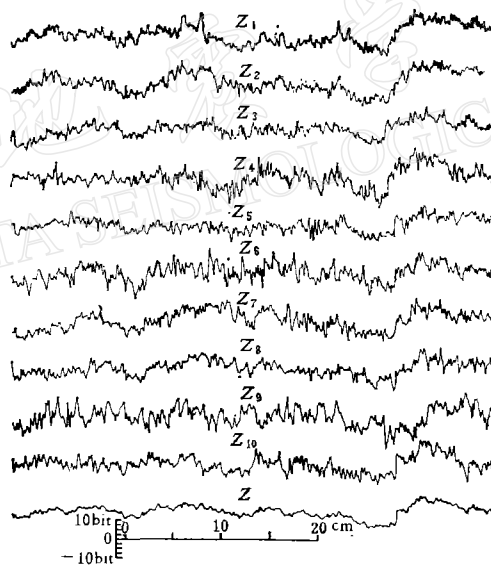


图1 数字化噪声曲线

从图1不难看出, 取自同一条直线上的离散取样点已不在一条直线上, 由取样点连成的曲线都包含着下列两种成份:

第一, 在每一条曲线上有着一种相同的变化趋势(见图1中的曲线 \bar{Z})。可以认为, 这是由于数字化设备不完善(例如: 导轨不平直, 安装读数机放大镜有偏差和换能器的偏差等等)引起的设备系统误差。

第二, 除系统误差外, 每条曲线上还迭加了一种随机干扰, 这是数字化过程中产生的随机噪声。它是由操作者的视差和随机地选择取样点, 以及模数转换设备包含的误差等因素所造成的。

如果把随机噪声看作是按高斯规律分布的,那么,系统误差 \bar{Z} 便可通过十条数字化噪声的平均值,即通过 $\bar{Z} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} Z_i$ 获得,而这条直线每一次的读数结果 Z_i 以系统误差 \bar{Z} 的差 $Y_i = Z_i - \bar{Z}$,代表主要由操作者的视差所产生的随机误差。作为示意,图 2 画出了 Y_1, Y_4 和 Y_9 。

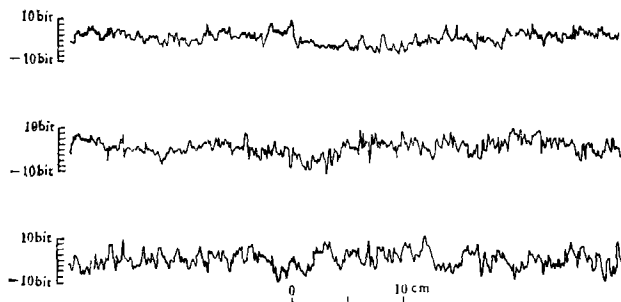


图 2 随机数字化噪声曲线

因为按现行的数字化方法^[2],每一条加速度迹线的读数,都要减去同一张记录图上的固定迹线的读数,这样就消除了系统误差的影响。因此,以下只限于对随机误差作进一步的分析和讨论。

三、随机数字化噪声的性质

如上述,随机数字化噪声可以用 $Y_i = Z_i - \bar{Z}$ 来表示。为了研究随机噪声的特性,计算了它们的平均值。我们从两种意义上去计算:一种是对 Y_i 母体中的全部子样取平均值,即求 Y_i 的数学期望。显然,随机噪声的数学期望应等于零;另一种是对每条噪声曲线沿其横座标轴上的所有离散值取平均值,也就是对时间的平均值:

$$\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N Y_i(m) = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N [Z_i(m) - \bar{Z}(m)]$$

($i = 1, 2, \dots, 10$)。计算结果列于表 1。

表 1 随机噪声的统计特征(单位: bit)

| 编号 | Y_1 | Y_2 | Y_3 | Y_4 | Y_5 | Y_6 | Y_7 | Y_8 | Y_9 | Y_{10} | 平均 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|--------|
| 平均值 | -0.15 | -0.03 | 0.16 | 0.04 | -0.07 | 0.03 | 0.18 | 0.07 | -0.17 | -0.07 | -0.001 |
| 标准方差 | 3.1 | 3.0 | 2.3 | 3.5 | 2.5 | 3.3 | 3.4 | 2.5 | 3.8 | 2.9 | 3.03 |
| 最大误差 | 8.0 | 8.9 | 6.4 | 12.3 | 8.0 | 11.0 | 11.6 | 7.9 | 10.9 | 10.0 | 9.5 |

由表 1 可见,随机噪声按时间的平均值也接近于零,与数学期望十分相近。因此,可以认为这种随机噪声是具有各态历经性质的^[3]。

其次,计算它们的标准方差:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N Y_i^2(m)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N [Z_i(m) - \bar{Z}(m)]^2}$$

$$(i = 1, 2, \dots, 10)$$

计算结果也列于表 1。随机噪声的平均标准方差为 3bit, 即大致相当于数字化设备纵轴分辨率的 3 倍。

再次, 为了计算随机噪声曲线幅值的概率分布函数, 对每条曲线的每个离散点计算 $Y_i(m)/\sigma_i$, 并对此比值进行了统计分析, 画出它们的频度分布图。频度分布图的横座标以相应的 σ_i 为基本级间区间长度, 共划分为九个区间, 相应的级间代表值为 -4、-3、-2、-1、1、2、3、4; 纵座标为 $Y_i(m)/\sigma_i$ 落入各级间区间内的次数(或频度)。这样就得到如图 3 所示的十条随机噪声的概率分布曲线(实线)。在图 3 中, 还用虚线画出按高斯规律分布的、标准方差 $\sigma = 3$ 的概率密度曲线。容易看出, 这些分布曲线的形状是十分相近的。由此可见, 假定随机噪声按高斯规律分布是正确的。

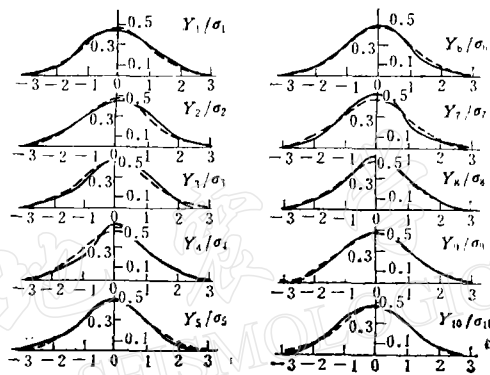


图 3 随机噪声的概率分布曲线
(虚线为高斯分布曲线)

归纳上述分析结果可知:

1. 随机数字化噪声是一种幅值按正态规律分布的, 具有各态历经性质的平稳随机过程。

2. 随机数字化噪声的平均标准方差为 3bit。若设加速度记录的最大振幅为 2 厘米, 且加速度仪的记录灵敏度 $a = 0.01$ 厘米/伽, 则相应的噪声加速度方差为 1.5 伽, 由此引起的信噪比下降小于 1%。表 1 列出的平均最大噪声为 9.5bit, 相应的最大噪声加速度为 5 伽, 信噪比将下降 3%。

四、随机数字化噪声的频谱特征

为了解随机数字化噪声在频率域上的分布特征, 分别计算十条随机噪声 $Y_i (i = 1, 2, \dots, 10)$ 的富里埃 (Fourier) 振幅谱及其平均谱。图 4 给出了其中部分结果。图 4 表明: 随机数字化噪声的能量主要集中在长周期部分 (大于 5 厘米), 短周期部分 (小于 1 厘米) 的谱值一般在 0.1bit 左右, 中等周期部分 (约在 1—5 厘米) 的谱值也只有 0.2bit 左右。随着频率下降 (周期增大), 噪声的谱值明显增加。当频率下降为 0.2/厘米 (周期为 5 厘米) 时, 谱值增加到 0.6bit (个别达到 1.3bit) 以上。由于噪声的能量主要集中在低频段, 说明

为什么随机数字化噪声对实际加速度记录的影响一般并不大，而对二次积分的位移却有着严重的影响。下面将会看到，在由加速度记录进行二次积分计算位移曲线时，随机噪声中的长周期分量将大大增强，从而导致计算位移曲线的严重失真。

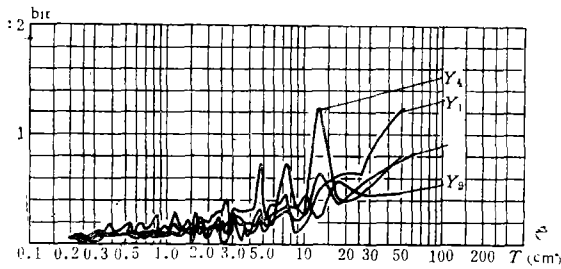


图 4 随机噪声的富氏振幅谱

五、随机数字化噪声对计算地震位移的影响

强地震时，靠近震中区的地震位移曲线是近场地震学研究中的重要资料，也是地震工程研究中用来估算地震时地面位移和各类工程结构实际变形的重要依据。但是，目前尚无满意的直接测量强震时地震位移的观测仪器。因而，取得强震位移曲线的主要手段还有赖于对加速度记录的二次积分。

为了研究随机噪声对计算位移的影响，在零初始条件的假定下，用梯形积分公式分别计算十条随机噪声曲线的二次积分（以下称此积分结果为“噪声位移”，用 X_i 来表示）。部分“噪声位移”画于图 5，表 2 列出了主要的计算结果。

表 2 “噪声位移”的计算结果*

| 编 号 | 最大“噪声位移” (bit · 厘米 ²) | 折算的最大位移(厘米) $a = 0.01$ 厘米/伽 $b = 200\text{bit/厘米}$ | | |
|----------|--------------------------------------|--|-----------------|-------------------|
| | | 纸速 $v = 1$ 厘米/秒 | 纸速 $v = 2$ 厘米/秒 | 纸速 $v = 4.8$ 厘米/秒 |
| X_1 | 409.9 | 205.0 | 51.2 | 8.9 |
| X_2 | 235.5 | 126.8 | 31.7 | 5.5 |
| X_3 | 173.6 | 86.8 | 21.7 | 3.8 |
| X_4 | 190.6 | 95.3 | 23.8 | 4.1 |
| X_5 | 212.0 | 106.0 | 26.5 | 4.6 |
| X_6 | 264.1 | 132.1 | 33.0 | 5.7 |
| X_7 | 447.3 | 223.7 | 55.9 | 9.7 |
| X_8 | 173.8 | 86.9 | 21.7 | 3.8 |
| X_9 | 67.3 | 33.7 | 8.4 | 1.5 |
| X_{10} | 131.0 | 65.5 | 16.4 | 2.9 |
| 平 均 | 233.0 | 116.5 | 29.1 | 5.1 |

* 记录长度为 51.2 厘米。

计算表明：对于长度 $L = 51.2$ 厘米的记录来说，平均最大“噪声位移”为 233 bit · 厘米²，若设记录纸走速 $v = 1$ 厘米/秒，相应的记录持续时间为 $L/v = 51.2$ 秒。若选取的记录灵敏度 a 和读数灵敏度 b 分别是 0.01 厘米/秒和 200bit/厘米，相应的最大“噪声位

移” $X_{\max} = 233/(a \cdot b \cdot v^2) = 116.5$ 厘米。迄今为止, 世界上已经测得的或者从加速度记录算出的最大相对位移约为数十厘米。显然, 如果不对随机噪声加以抑制或消除, 那么混杂在地震位移中的“噪声位移”, 必然会给有关的研究工作带来严重的影响。

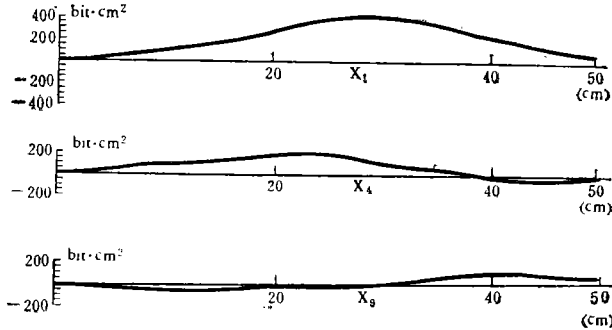


图5 “噪声位移”曲线

显然, 这种“噪声位移”的大小与记录的持续时间有关。一般地讲, 持续时间越长, “噪声位移”越大, 反之亦然。对于我国目前使用的 RDZ1-12-66 型强震仪, 通常采用的记录纸走速为 4.8 厘米/秒, 若记录长度 L 为 51.2 厘米, 相应的持续时间为 $L/v = 17$ 秒, “噪声位移”达到 5.1 厘米。

图 6 给出了“噪声位移”的富里埃振幅谱。与图 4 相比, 一个明显的特点是, 长周期分量的谱值显著地增大了。在图 4 中, 随机噪声长周期分量的谱值, 虽然要比短周期和中等周期分量的谱值大一些, 但前者不过是后者的 3—10 倍。在图 6 中, 前者比后者竟大 500—600 倍, 甚至上千倍。“噪声位移”的这一特征, 也可以直接从图 5 的“噪声位移”显示出来的长周期波形得到证实。幸运的是, 这样的噪声背景, 恰为我们采用数字滤波方法去抑制或消除混在数字加速度记录中的噪声, 提供了可能。

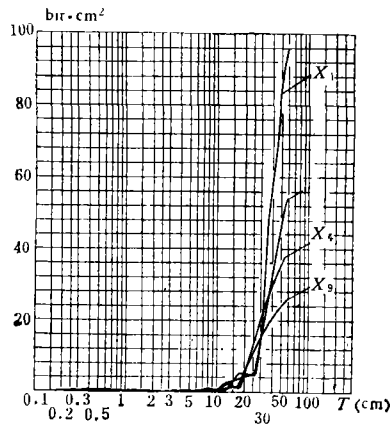


图6 “噪声位移”的富氏谱

六、消除随机数字化噪声, 提高记录信噪比的方法

“噪声位移”的频谱特征表明, 导致严重的“噪声位移”的主要原因, 在于噪声中长周期

分量的作用。为了抑制或基本消除计算位移中的噪声,就应当把加速度记录中的长周期分量滤除,但与此同时将失去同样周期成分的地震信息。因此,为了抑制噪声,保留信息,就应该在信息和噪声中间寻求适当的平衡,既能最大限度地去掉不需要的噪声,同时又能尽量多地保留记录中的有用信息。从图 6 可见,在周期小于 26 厘米时,“噪声位移”的振幅谱值很小,一般还不到 $5\text{bit} \cdot \text{厘米}^2$,而当周期大于 26 厘米时,谱值就急剧地增加。因此,为了取得抑制噪声,保留信息的最佳效果,在一般情况下可以选择 $T_c = 26$ 厘米作为高通滤波的截断周期。当记录纸的走速分别为 1、2、5 厘米/秒时,对应的截断周期便为 26、13、5.2 秒。这样,经过高通数字滤波后,周期小于 26 厘米的地震信息将得以保留,同时又较大幅度地去除了噪声的主要成分。可能残留下来的“噪声位移”的谱值约为 $5\text{bit} \cdot \text{厘米}^2$,如果将其近似地看作为正弦波,相应的位移振幅为 2.5、0.6、0.1 厘米(记录纸走速分别取为 1、2、5 厘米/秒)。应当指出,这里给出的数值是在假定仪器的记录灵敏度 $a = 0.01$ 厘米/伽的情况下得到的。如果 a 增大,折算的“噪声位移”将会相应地减小。

当然,截断周期的选取应当根据具体情况酌定。比如,若已知被测的地震动位移中含有振幅达数米的长周期分量,则在同样的信噪比条件下,可以容许有更大的“噪声位移”,于是,截断周期可以比 26 厘米更长。反之,若已知地震动位移的主要成分集中在短周期部分,且振幅较小,则在同样的信噪比条件下,截断周期应比 26 厘米更短些。下面,我们以“噪声位移” X_1 为例,计算出不同截断周期的高通数字滤波结果。

本文采用 Ormsby 滤波器^[4],其传递函数如图 7 所示。截断周期 T_c 分别选为 25、10、5 厘米。 X_1 经过高通数字滤波后的结果表示在图 8 和表 3 中。

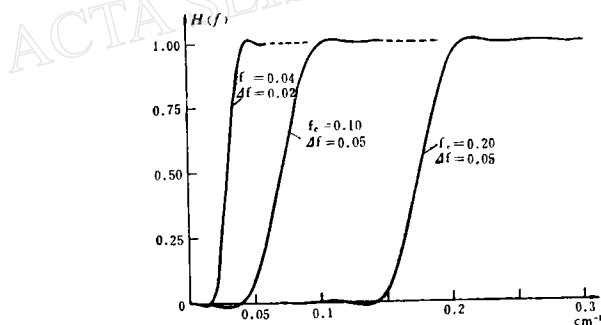


图 7 Ormsby 滤波器的传递函数

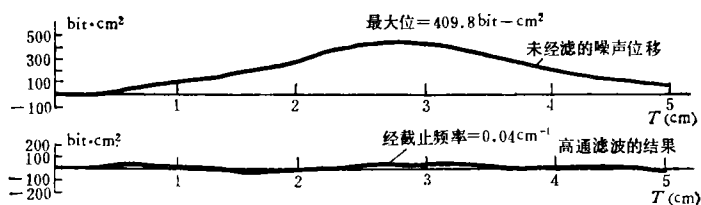


图 8 “噪声位移” X_1 及其滤波后的结果

显而易见,采用数字滤波方法能使“噪声位移”大大降低。当截断周期 $T_c = 2.5$ 厘米时,“噪声位移”只有原来的 $1/14$,当 $T_c = 5$ 厘米时,残留的“噪声位移”只有原来的 $1/82$ 。

表 3 X_1 经高通滤波后的结果

| 截断周期 T_c (厘米) | | 25 | 10 | 5 |
|-------------------------------------|---------------------|------|------|------|
| 滤波后的最大“噪声位移” (bit·厘米 ²) | | 29.3 | 8.5 | 5.0 |
| 折算的最大位移 (厘米) | 纸速 $v = 1$ (厘米/秒) | 14.7 | 4.3 | 2.5 |
| | 纸速 $v = 2$ (厘米/秒) | 3.7 | 1.1 | 0.63 |
| | 纸速 $v = 4.8$ (厘米/秒) | 0.64 | 0.18 | 0.11 |

虽然降低噪声总难免会伴随着地震动信息的丢失,但滤波后保留下来的地震动信息,其频率范围已大大超过了我国现有强震加速度仪的通频带。例如,当 $T_c = 25$ 厘米时,若记录纸走速为 1 厘米/秒,保留的信息其周期可长达 25 秒。这样,已基本上能够满足工程和研究工作的需要。

顺便指出,这里给出的截断周期是以长度(厘米)为单位的,若要折算为时间域上的单位,应除以相应的记录纸走速。显然,记录纸走速越快对应的截断周期(秒)将越短,能保留的地震信息的频带就越窄。因此,提高仪器的记录纸走速,虽然对于分辨高频信号有利,但却要付出丢失低频信息的代价。所以,在确定仪器的记录纸走速时,应综合考虑对高、低频信号的要求,而不要片面地强调和追求某一方面的效果。

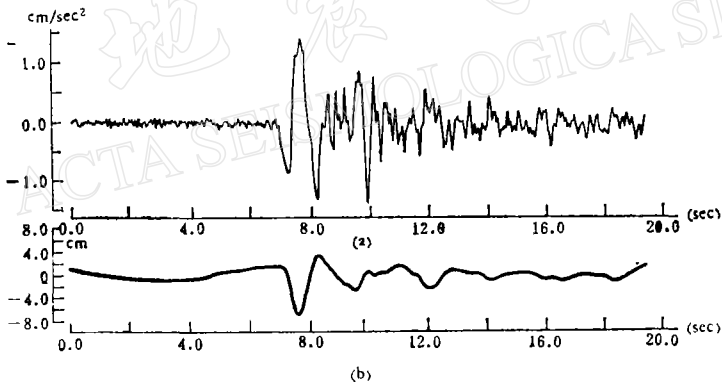


图 9 经数字滤波的宁河地震加速度记录和计算位移

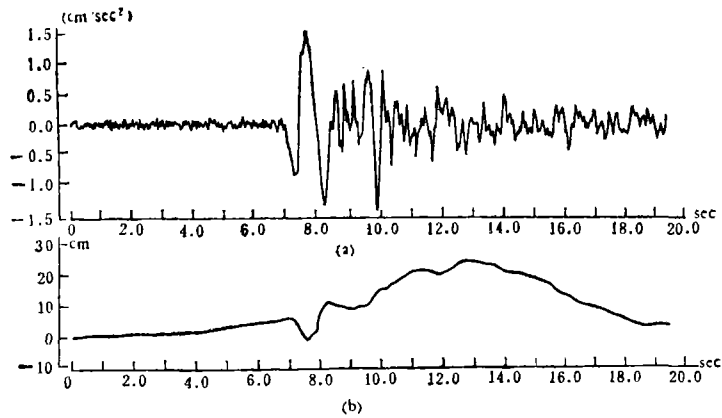


图 10 未经数字滤波的宁河地震加速度记录和计算位移

图 9 是对宁河地震 (1976.11.15, $M = 6.9$) 加速度记录 (天津医院地面, 南北向) 进行数字滤波后的结果。记录纸走速 $v = 4.8$ 厘米/秒。滤波器的截断频率 $f_c = 0.15$ 赫兹, 过渡带宽 $\Delta f = 0.05$ 赫。图 9 (a) 是滤波后的加速度记录, 图 9 (b) 是滤波后的计算位移曲线 (初始条件假定为零)。为了进行对比, 把未滤波的加速度记录和相应的计算位移曲线画于图 10。由图 9 和图 10 不难看出, 带噪声 (未滤波) 的加速度记录与低噪声 (经滤波) 的加速度记录相差不大。但对位移曲线来说, 两者的差别十分显著。图 10 (b) 中的位移曲线与其说是地震位移曲线, 倒不如说它更象图 5 的“噪声位移”曲线。由于噪声的存在, 地震位移曲线 [图 9 (b)] 已被“噪声位移” (图 5) 所“淹没”, 变得面目全非了, 最大峰值竟相差 330%。

七、结 语

研究表明: 在对模拟图形进行数字化研究的过程中, 难免会引入数字化噪声, 这种噪声一方面来源于数字化设备的不完善所造成的系统误差, 另一方面来源于因操作者的视差和其它各种随机因素所造成的随机数字化误差。

对于长度约为 51.2 厘米的十条随机噪声曲线共 5120 个样品数据的统计分析表明: 随机数字化噪声, 是一种振幅按高斯正态规律分布, 具有各态历经性质的平稳随机过程。其标准方差平均为数字化设备纵轴分辨率的三倍, 约为 3bit。在随机噪声的频谱中, 长周期分量占的比重较大。因此, 对加速度记录的影响不大, 由此引起的信噪比下降约为 1—3%。经过二次积分, “噪声位移”的长周期分量显著地增长, 使实际地震位移曲线受到严重的歪曲。然而, “噪声位移”的频谱特征却为抑制这种噪声提供了可能性。实际计算分析表明: 只要恰当地选择滤波的截断频率, 可以采用数字滤波的方法来消除混杂在实际记录中的随机噪声, 从而计算出满意的地震位移曲线。在一般情况下, 建议滤波器的截断周期选为 $26/v$ 秒 (v 为记录纸走速, 单位: 厘米/秒)。

参 考 文 献

- [1] M. D. Trifunac, Low frequency digitization errors and a new method for zero baseline correction of strong-motion accelerograms, *EERL*, 70—07, California Institute of Technology, Pasadena, California, Sept. 1970.
- [2] D. E. Hudson, N. C. Nigam and M. D. Trifunac, Analysis of strong-motion accelerograph records, *Fourth World Conference on Earthquake Eng., Santiago, Chile*, I, A2: 1—17, 1969.
- [3] A. Papoulis, *Signal Analysis*, McGraw-Hill, 352 pp., 1977.
- [4] J. F. A. Ormsby, Design of numerical filters with application to missile data processing. *J. Assoc. Comput. Mach.*, 8: 440—466, 1961.

THE EFFECTS OF DIGITIZATION ERRORS ON ANALYSIS OF STRONG-MOTION RECORDS AND THEIR ELIMINATION

XIE LILI QIAN QUKANG LI SHABAI

(Institute of Engineering Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

Detailed analysis of digitization errors resulting from the processing of digitizing strong motion accelerograms is made in this paper. It shows that the digitization errors can be considered as a superposition of systematic errors introduced by the digitizing equipment and random noise errors produced mainly by operators. It also shows that the random noise is an ergodic stationary random process, the amplitudes of which are of Normal Gauss Distribution, and the long period components of their frequency content are apparently predominant. It will, thus, give a serious effect on the double integrated displacement from a digitized accelerogram containing these errors. But further studies indicate that random digitized noise displacements are mainly distributed in the range of periods longer than 25 second and give relatively small values up to a period of 25 second for the accelerogram, the typical recording speed of which is 1 cm/sec. Accordingly, a background of random noise is obtained and most parts of such noise could be filtered out from the digitized accelerograms by using of the digital filtering. A typical filtered accelerogram and its double integrated displacements are given as an example and a comparison with the unfiltered accelerogram and its respective displacements is also made.