

# 宽频带大动态地震数据压缩 的一种实时算法<sup>\*</sup>

李沙白<sup>\*\*</sup>

(中国哈尔滨 150080 国家地震局工程力学研究所)

刘启元 沈立人

(中国北京 100029 国家地震局地质研究所)

## 摘要

给出了对宽频带大动态地震数据进行分块归一逻辑压缩和“两点取一”物理压缩的实时算法。利用数值模拟和地震观测数据对算法所进行的检验表明,这两种算法综合使用的数据精度损失在时域小于 1%,在谱域小于 5%,其压缩比大于 3。利用这两种数据压缩方法发展的数据压缩软件已在 GDS-1000 型通用流动数字地震仪上使用。

**关键词** 宽频带; 大动态; 数据压缩

## 1 引言

随着数字地震观测记录设备的迅速发展,数据压缩技术已广泛应用于地震数据的记录和传输。数据压缩方法,大体上可以分为三大类:逻辑压缩、物理压缩以及这两类方法的混合压缩。

所谓逻辑压缩是通过编码方式,数据格式的优化或者对信源数据冗余信息的逻辑判断,以尽可能少的数据编码表示原有数据的信息量。利用 Shanon-Huffman 编码技术进行数据压缩是这类方法的一个典型例子(Kanasewich, 1981)。这类方法在实际应用中的限制是要求预先知道信源数据的统计特性。利用预测法减少数据字长是逻辑压缩的另一个典型例子。例如,SSA-1 型固态数字强震仪,利用预测法对 12 位字长的整型数据进行压缩,得到了 2 倍左右的压缩比(Kinemetrics, 1987)。

所谓物理压缩则是根据对信源数据在时域或谱域中物理特征的假定所做的数据压缩。利用对信源数据的各种正交变换进行数据压缩的方法就属于这一类(Kanasewich,

\* 1992 年 10 月 10 日收到初稿,1993 年 1 月 20 日决定采用。

\*\* 现在地址: 北京 100080 北京强震观测中心。

1981). 由于数字地震仪一般都是根据观测信号的频带设置采样率, 因而正交变换方法的实际压缩数据能力受到很大限制。另一种物理压缩方法则是根据信源的频率变化, 通过自动改变采样率来实现的(郭洪升, 1987)。这种方法的优点是适合于浮点数据的实时压缩处理。在某些情况下, 例如, 波形比较光滑的远震数据, 可以得到较大的压缩比。

本文的目的在于给出一种具有较高数据压缩恢复精度的地震数据压缩方法。它可以用于宽频带大动态地震数据的实时压缩和恢复。本文描述的方法已用于新近研制的 GDS-1000 型通用流动数字地震仪(刘启元等, 1993)。

## 2 地震数据的一种实时压缩算法

本文给出的数据压缩算法包括“两点取一”和分块逻辑压缩两部分。

### 2.1 “两点取一”法

对于大部分数字仪器的设计, 为了提高数据的精度, 实际使用的采样率

$$s \geqslant 4f_c \quad (1)$$

式中,  $f_c$  为信号的截断频率, 如果能够找到一种精确的中点内插法, 那么只需存储半数的采样, 其余半数则可用精确的中点内插法进行恢复。

设时域函数为  $g(t)$ , 相应的 Fourier 变换为  $G(f)$ 。其中,  $t$  为时间变量,  $f$  为频率。对  $g(t)$  以等步长  $\tau$  进行采样, 得到  $g(k\tau)$ 。 $g(k\tau)$  的 Fourier 变换  $G_\tau(f)$  是周期等于  $1/\tau$  的周期函数(Papoulis, 1962)。由褶积定理可得

$$g(t) = \text{sinc}(t/\tau) * \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k\tau)\delta(t - k\tau) \quad (2)$$

式中,  $\delta(t - k\tau)$  为狄拉克函数,  $\text{sinc}(t/\tau)$  为矩形窗函数的 Fourier 变换,  $*$  表示褶积。欲求任意时刻  $t=t_0$  时  $g(t)$  的值  $g(t_0)$ , 只需计算

$$g(t_0) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k\tau)\text{sinc}(t_0/\tau - k) \quad (3)$$

特别是当  $t_0 = (m + 0.5)\tau$  ( $m$  为整数) 时, 即求两个采样点的中点的插值时, 有

$$g((m + 0.5)\tau) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k\tau)\text{sinc}(m - k + 0.5) \quad (4)$$

这样, 欲求每相邻两个采样点的中点插值, 只需计算  $g(k\tau)$  与  $\text{sinc}(m + 0.5)$  的褶积。

为了进行完全精确的中点内插, 权系数  $\text{sinc}(m + 0.5)$ , 需无穷多个。实际计算表明, 当选用 40 个权系数时, 就可以得到有足够精度的中点内插结果。

采用“两点取一”法进行数据压缩是简单而有效的。在实际应用中, 只要式(1)成立, 就可以每两个采样点仅存储一个点, 舍弃另一个点。显然, 用这种方法可得到的数据压缩比为 2。在后续的数据处理中, 利用式(4)可求出所有中点的插值。

### 2.2 分块归一逻辑压缩法

#### 2.2.1 逻辑压缩

逻辑压缩是基于如下的事实: 如果一个采样点的值  $Y$  和用前两个采样点的值所做的线性预测值之差  $\Delta Y$  小于原采样值  $Y$ , 那么存储  $\Delta Y$  所需的字长则比  $Y$  要短。如果已知前两个采样点的值和  $\Delta Y$ , 那么,  $Y$  值就可以精确地求出。

设采样是等步长进行的, 相邻 3 个采样点的值分别为  $Y_s$ ,  $Y_{s+1}$ ,  $Y_{s+2}$ .  $Y_{s+2}$  的线性预测值  $\tilde{Y}_{s+2}$  可由  $Y_s$  和  $Y_{s+1}$  求出. 两者之差为

$$\Delta Y_{s+2} = Y_{s+2} - (2Y_{s+1} - Y_s) \quad (5)$$

如果第  $n+1$  个样点恰为峰点(或谷点), 则令

$$\bar{Y}_{s+2} = 2Y_{s+1} - Y_s \quad (6)$$

$\bar{Y}_{s+2}$  与  $\tilde{Y}_{s+2}$  的差  $\Delta\bar{Y}_{s+2}$  为

$$\Delta\bar{Y}_{s+2} = Y_s - Y_{s+2} \quad (7)$$

如果由式(5)计算  $\Delta Y_{s+2}$ , 则令标记  $FL=0$ ; 如果由式(7)计算  $\Delta\bar{Y}_{s+2}$ , 则  $FL=1$ .

一般来说, 只要存储了第 1 和第 2 个样, 又存储了一系列  $\Delta Y$ (或  $\Delta\bar{Y}$ ), 就可以精确地计算出所有的采样值.

## 2. 2. 2 分块归一

逻辑压缩算法已经成功地应用于动态范围不大的固态数字地震仪. 例如, Kinematics 的 SSA-1 仪器, 其动态范围为 66 dB(Kinematics, 1987). 对于动态范围大于 100 dB 且采用浮点技术的仪器, 直接使用逻辑压缩来实现数据的压缩是十分困难的.

分块归一逻辑压缩法是基于这样的事实: 在一个地震事件中, 采样数据的动态变化范围在该事件的不同部分是大不相同的. 如果采样数据以给定的长度(例如, 128 个样)顺序分块, 那么就可以对每一个数据块的动态进行判断. 若动态过大, 则不做数据压缩. 反之, 若动态在一定范围内, 那么, 就可以在满足给定精度的条件下, 实现分块归一逻辑压缩.

目前, 很多数字地震仪器的设计采用了增益自动控制技术. 每一个采样数据由 A/D 数据尾码(12 位)和阶码(1~4 位)两部分组成. 如果一个数据块的采样阶码不完全相同, 也是不能实现逻辑压缩的. 为了实现逻辑压缩, 一块采样数据的阶码必须归一(即折算为相同的阶码). 但是, 若不加任何约束, 对于动态范围大的数据块, 截断误差可能过大. 另一方面, 实际的采样数据块, 阶码完全相同者太少, 若不进行阶码归一, 整个事件的数据压缩比过低. 因此, 应当寻求若干判据, 使结果既保证了足够的精度又具有可用的压缩比. 本文使用了两个判据: 第一个判据是一块数据各阶码之差不得大于 2(增益为 16). 第二个判据是, 在满足第一个判据的条件下, 实际采样值与线性预测值的差的绝对值要小于 1024. 只有满足上述两个判据的数据块, 才进行逻辑压缩. 并将一块数据中最大的压缩

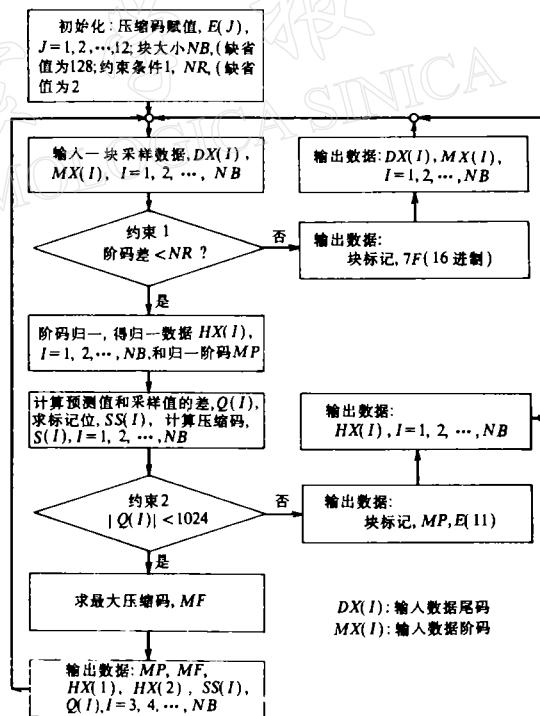


图 1 分块归一逻辑压缩流程图

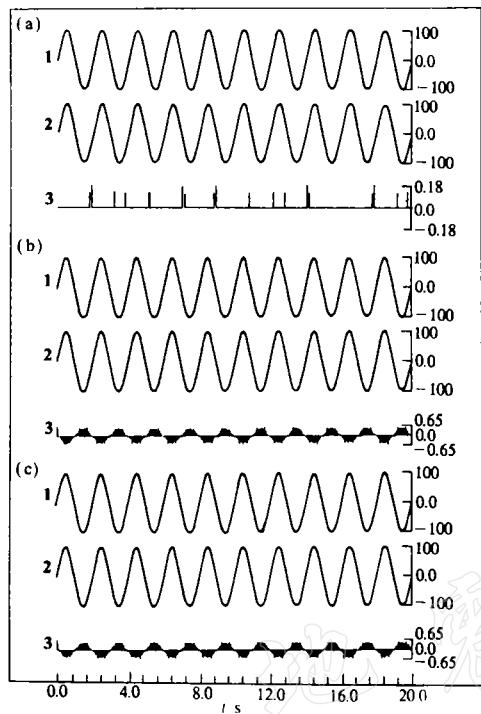


图2 在时域压缩方法的精度损失检验——数值模拟. 图中正弦曲线的频率为0.5 Hz. 采样率为200样/秒. 图中右边度的数值表示各波形之间的振幅比值. (a) 表示分块逻辑压缩; (b) 表示物理压缩; (c) 表示混合压缩: 分块逻辑压缩+物理压缩; 图中数字, 1. 表示输入数据, 2. 表示压缩恢复数据, 3. 表示输入数据与压缩恢复数据的差值

码定义为块压缩码.

### 2.2.3 数据存储

经过分块归一逻辑压缩处理后, 对任意一个采样数据块, 可能有三种情况. 相应地, 数据有三种存贮方式. 为了识别这三种情况, 将每块存贮的第一个字节作为块标记字节.

情况1: 用于不满足判据一的数据块. 依次写入原来的每一个采样数据. 每个采样数据占16位. 其中, 12位A/D数据, 另外4位为增益码数据.

情况2: 用于满足判据一而不满足判据二的数据块. 第一个字节(块标记), 写入 $XEH$ (十六进制值),  $X$ 为该块数据的归一阶码,  $E$ 表示此块未做逻辑压缩, 其后, 依次写入经阶码归一处理的采样数据, 每个数据占12位.

情况3: 用于满足判据一和判据二的数据块. 第一个字节(块标记)写入 $XYH$ ,  $X$ 为该块数据的归一阶码,  $Y$ 为该块数据的压缩码. 之后, 先存放本块的经阶码归一的第一个和第二个采样数据, 每个数据占12位, 然后, 顺序存放本块其余采样所对应的压缩数据, 每个压缩数据的字长均等于块压缩码.

块压缩码和压缩数据的字长见表1. 图1给出了分块归一逻辑压缩的计算框图.

表1 压缩码的定义

压缩码	压缩数据字长(位)	标记( $FL$ )位	差值(位)	最小差值	最大差值	压缩码	压缩数据字长(位)	标记( $FL$ )位	差值(位)	最小差值	最大差值
3	3	1	2	-2	+1	8	8	1	7	-64	+63
4	4	1	3	-4	+3	9	9	1	8	-128	+127
5	5	1	4	-8	+7	A	10	1	9	-256	+255
6	6	1	5	-16	+15	B	11	1	10	-512	+511
7	7	1	6	-32	+31	C	12	1	11	-1024	+1023

### 3 压缩数据恢复精度的检验

本文提出的地震数据压缩算法的数据精度损失,主要由于以下两个原因:

(1) 在进行分块逻辑压缩时,由于每一块浮点数据的阶码需要归一,可能会有数据的移位损失. 对同一块数据而言,移位损失大的是数值相对较小的数据.

(2) 对于“两点取一”数据压缩,数据恢复的精度主要取决于权系数的个数. 一般来说,权系数个数越多,恢复精度越高.

我们采用数值模拟的方法来分析和计算由于数据压缩算法造成的数据精度损失. 输入数据为正弦函数的浮点数据. 其尾数为 12 位,阶码为 1—9,每一阶的增益变化为 2. 进行分块逻辑压缩时,每一块数据的样点数为 128. 数据压缩的限制条件是在同一块数据中的阶码变化不超过 4. 这个仿真系统相当于动态范围为 126 dB 的数字地震记录仪的 A-D 转换系统. 利用本文所述的压缩方法对其进行数据压缩,并在时域中对压缩数据的精度损失进行检验. 其结果如图 2 所示.

由图 2a 可见,对于分块逻辑压缩的来说,精度损失主要出现在数值相对较小的部分. 这是因为每一块数据都按其中的最小阶码归一,阶码大的数据尾数发生右移所造成的. 由图 2b 可以看到,对于本文采用的物理压缩方法,即“两点取一”法来说,恢复后的压缩数据与原始数据的差和原始数据的振幅大小变化一致. 根据其最大振幅与原始数据最大振幅的比可知,压缩数据的精度损失为 6.5%. 这里,进行数据恢复时采用了 40 个权系数. 比较图 2b 和图 2c 可知,逻辑压缩算法所造成的数据精度损失远小于物理压缩的精度损失. 事实上,本文的逻辑压缩算法中最大可能产生的移位损失为 4 位,对于 12 位尾数的数据,可能产生的最大精度损失为 3.9%. 图 2a 给出的结果在此误差范围之内.

图 3 和图 4 分别给出了在时域和频域中,用实际地震观测数据对本文的数据压缩算法的精度损失的检验结果(图中(1)为观测数据, (2)为被恢复的压缩数据, (3)为两者

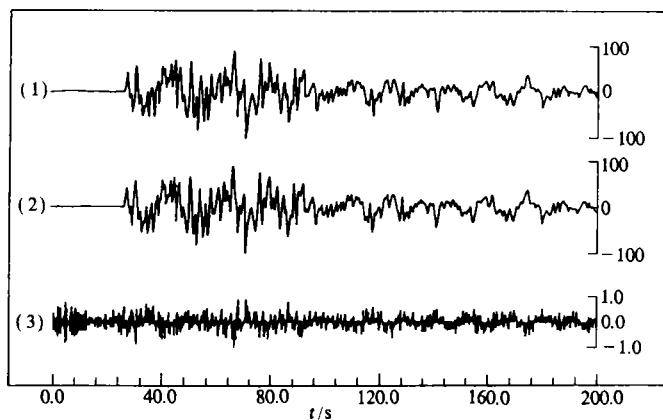


图 3 在时域,混合压缩方法的精度损失检验——地震观测数据. 输入数据为在北京台记录的 CDSN 宽频带地震波形的垂直分量. 发震日期: 1987 年 7 月 6 日,发震时刻 15:58:35. 620(北京时间),  $M_b=6.7$ , 震中距为  $21.10^\circ$ , 采样率为 20 样/秒, 纵座标为相对比值

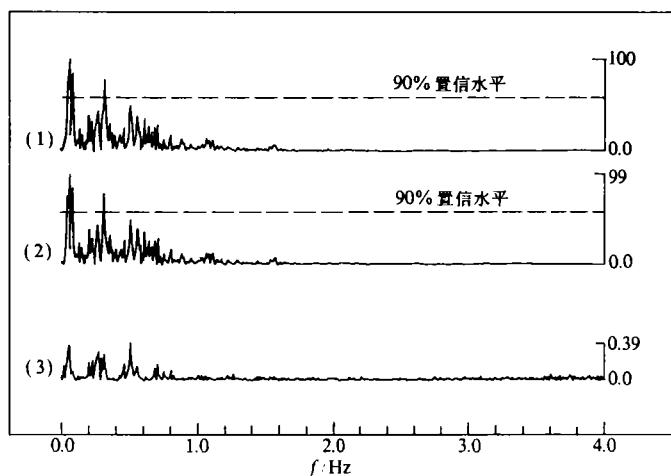


图 4 在频域混合压缩方法的精度损失检验——地震观测数据

之差).计算结果表明,分块逻辑压缩的数据精度损失很小,在频域约为 1%;物理压缩的精度损失在时域为 1%,在频域为 4.2%.当综合使用这两种压缩方法时其结果与仅采用量压缩的情况没有明显差别.在频域恢复数据的误差比由 Fisher 检验所给出的 90% 置信水平线要低得多.恢复数据的谱与输入数据的谱之间并不存在可以辨认的差别.

#### 4 数据压缩比的检验

为了检验本文给出的压缩算法的数据压缩能力,表 2 列出了实际记录的 10 个地震事件的数据压缩比.图 5 给出了一个实际波形的例子.所用记录器为 GDS-1000 数字地震仪,传感器为 BKD-1 速度拾振器,记录频带为 0.05—5.0 Hz(刘启元等,1993).

表 2 地震参数及数据压缩比(台站名:北京西拔子,纬度:40.35°,经度:115.98°)

序号	发震时刻		震中位置		震中距 (°)	深度 (km)	震级	记录长度 (s)	压缩比
	年-月-日	时:分:秒	φ(°)	λ(°)					
1	1992-01-13	09:37:43.7	20.89S	178.74W	86.16	575	5.5	120	2.0198
2	1992-01-22	01:06:55.4	38.46N	104.36E	18.87	116	5.5	120	2.2978
3	1992-03-19	06:34:25.9	17.16N	120.83E	23.57	17	5.8	120	1.1299
4	1992-04-04	00:10:14.4	40.45N	116.20E	0.19			120	1.9865
5	1992-04-19	18:32:19.9	23.79N	121.54E	17.21	23	5.9	120	1.1554
6	1992-05-21	04:59:57.4	41.59N	88.80E	20.47		6.6	180	1.2714
7	1992-05-22	15:22:22.4	38.51N	116.50E	1.88	10	3.4	80	1.2318
8	1992-05-22	22:20:29.4	40.56N	115.78E	0.25	9	1.4	180	1.6032
9	1992-05-23	03:19:51.6	38.67N	116.38E	1.71	13	2.6	180	1.4188
10	1992-05-23	17:40:04.3	38.73N	116.50E	1.67		2.6	180	1.2098
平均压缩比									1.532

注:远震事件参数根据 PDE 报告,近震事件参数根据北京台网报告.

“两点取一”压缩算法的压缩能力是显而易见的.我们这里仅对本文的逻辑压缩算法

进行了检验。由表 2 可见, 其压缩比的平均值为 1.53。如果综合使用分块逻辑压缩和“两点取一”的物理压缩算法, 一般可以得到大于 3 的压缩比。另外, 压缩比的大小还和选用的数据有关。如果对事件的完整数据进行压缩处理的话, 其压缩比会比表 2 所给的值大。

## 5 结 论

本文给出的宽频带大动态地震数据压缩算法, 可以有效地用于地震数据的实时压缩。分块归一逻辑压缩法的数据精度损失, 在时域中不大于 3.9%, 在频域中为 1%。“两点取一”法的精度损失在时域中不大于 1%, 在频域中为 4.2%。

分块归一逻辑压缩法可以实现平均为 1.53 的压缩比, “两点取一”数据压缩可以有 2 倍的压缩比, 综合使用时, 一般可以给出大于 3 的平均压缩比。

本文提出的压缩算法已形成了相应的固化软件, 并用于最近研制的 GDS-1000 通用流动数字地震仪。在 GDS-1000 通用流动数字地震仪中设计了四种数据压缩方式。这四种方式是: (1)仅作分块归一逻辑压缩; (2)仅作“两点取一”数据压缩; (3)分块归一逻辑压缩和“两点取一”同时使用; (4)原样照记。用户可根据自己的需要进行选择。

笔者对国家地震局震害防御司的支持表示感谢。

## 参 考 文 献

- 郭洪升, 1987. 地震数据的实时自适应压缩方法研究, 66. 国家地震局地球物理研究所硕士论文。
- 刘启元、李志明、沈立人、李沙白、周燕云、金国维、陈洪志、郭翠珍、沈扬、刘胜千、李顺成, 1993. GDS-1000 通用宽频带流动数字地震观测系统. 地球物理学报. 36, 600—608.
- Kanasewich, E. R., 1981. *Time Sequence Analysis in Geophysics (third edition)*, 364pp. The University of Alberta Press, Edmonton.
- Kinematics, 1987. *Operating Instruction for Model SSA-1 Solid-State Recording Accelerograph*, 168pp. Kinematics Inc., Pasadena CA.
- Papoulis, A., 1962. *The Fourier Integral and its Applications*, 318pp. McGraw-Hill, New York.

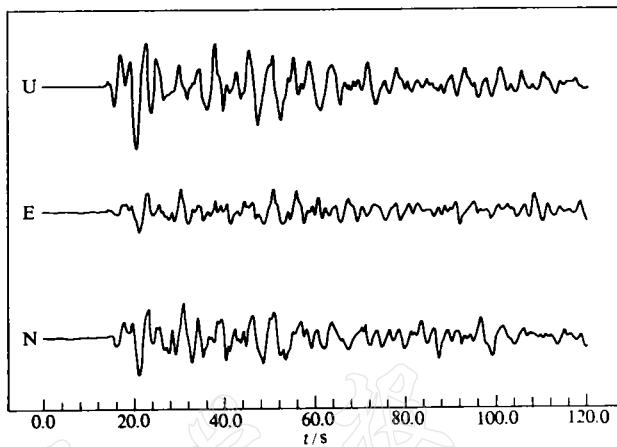


图 5 分块逻辑压缩后被恢复的三分量地震波形记录。这里给出的是 CDS-1000 宽频带数字地震仪在西拔子地震台记录到的 1992 年 3 月 19 日地震。发震时刻为 06:34:25.9.  $M_B=5.8$ ,  $\Delta=23.57^\circ$ , 震源深度为 17 km, 记录频带宽度为 0.05—6.0 Hz, 采样率为 25 样/秒。