

固体潮磁带记录的重取样及强地震 干扰的消除

李 鸿 吉

(国家地震局地球物理研究所)

摘 要

本文讨论取样间距为 5s 的固体潮磁带数据的重取样及消除强地震干扰的方法。

所提出的多项式拟合平滑取样方法 (PFSS) 使读带、平滑、取样同步进行。读带一结束，计算机内存就有了按给定间距的取样结果。由于只对有关点作格式变换和预处理，故可以节省计算时间；由于只存取样结果，故可以节省计算机空间。因此，这种方法适用于小间距而延续时间长的固体潮磁带数据。

采用功率谱分析，并对 PFSS 方法的结果作了检验，证明这种方法具有良好的滤波功能。

为了消除强地震干扰所引起的畸变，采用 Nakai 方法并给出迭代程序，也用谱分析作了检验。校正后的观测数据，其谱分析结果与理论潮结果相似。

一、引言

取样间隔为 5s 的固体潮磁带记录，主要包括有以下三种非潮汐成份：

1. 稳态干扰：呈上下均衡的高频振荡形态，噪声水平不随时间改变；
2. 非稳态干扰：最明显的是强地震干扰，呈上下不均衡的高频振荡形态，噪声水平随时间改变；
3. 长周期的漂移。

消除长周期漂移的方法很多^[6]，这里不再讨论。本文针对重取样所出现的问题，讨论消除稳态及非稳态干扰的方法，并对这些方法进行检验。

二、与读带同步的多项式拟合平滑取样 (PFSS)

如上所述，在固体潮磁带记录中含有高频分量。为了形成 1min, 5min, 10min，以至最终导致 1h 的取样间距，重取样前应首先去掉高频干扰，否则会引入假频。

考虑到取样点的计算值只与其前、后的若干读入值和自身值有关，故在读带时可采用跳跃式读法，只读有关点，甩掉无关点。为了去掉高频干扰，笔者采用多项式平滑。这种重取样过程可以用图 1 来说明。图 1(a) 表示在磁带机上转动着的磁带，每个间隔代表一

本文 1984 年 11 月 22 日收到，1985 年 5 月 15 日收到修改稿。

个数据点,其延续时间为 5s,数据点值用竖线高度来表示。为了得到点“1”的取样值,在点“1”前面取 6 个点,后面取 5 个点,加上它自身,共 12 个点。显然其延续时间为 1min。然后按下式作最小二乘拟合

$$y = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \cdots + a_n t^n \quad (1)$$

一般采用二次多项式,在求到 a_0, a_1, a_2 之后,代回(1)式,可得误差平方和为最小的曲线。将“1”点位代入(1)式,可得平滑值。图 1(a) 上的竖线表示 12 个数据点值,用(1)式拟合后作成一条曲线,在取样点(第 7 个点)上得到取样点值 h 。

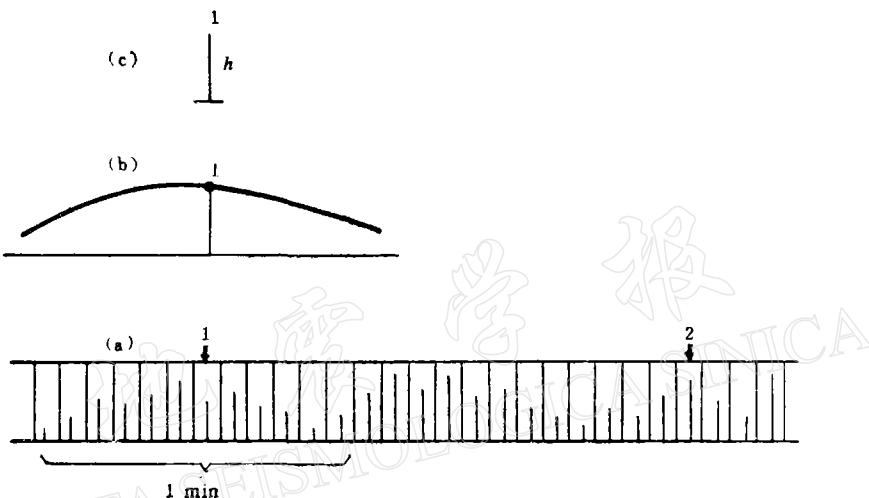


图 1 多项式拟合平滑取样 (PFSS) 过程 Process of PFSS

(a) 运动中的磁带(每格代表一个数据,其延续时间为 5s,里面的竖线高度表示磁带上的数值)

Tape in motion (Each stripe represents a datum whose duration is 5 seconds. The height of the vertical line in each stripe represents the value of the datum)

(b) 点“1”前后共 12 个点值取到内存,然后用多项式拟合形成平滑曲线

Inputting altogether 12 values before and after the point “1” (including itself) into the internal memory, and then using a polynomial fit to form a smooth curve

(c) 将点“1”的点位代入多项式求出平滑值

Substituting point “1” into the polynomial and then finding a smooth value, h

点“1”处理完后,接着处理点“2”,然后再处理点“3”等等(图 1)。

为了得到更高精度的拟合,可以采用三次以至四次多项式。如果 1min 的读入值不足以消除某些高频干扰,则可以采用 2min (24 个点),以至 3min (36 个点) 等等。在程序设计时,可以按不同的要求进行选择。

上述取样过程是与读带同步进行的,读带一结束,计算机内存就有了给定间距的取样结果。由于只对有关点作格式变换和预处理,这可以节省计算时间;由于只存取样结果,故又可以节省计算机的空间。

三、PFSS 的检验

图 2(a) 是根据磁带上每 5s 一个点,延续 22h 的原始数据所作的曲线。由于叠加有强

烈的高频分量,其振幅差达到 210,000(这是标定前的相对值),致使固体潮周期变得不明显。图 2(b)是多项式平滑取样后所作的曲线,取样间距为 10min,拟合区间为 1min(12 个点),延续时间与图 2(a)一样,也是 22h。在这条曲线上,明显地消除了高频振荡,振幅差减少为 30,000(相对值)。

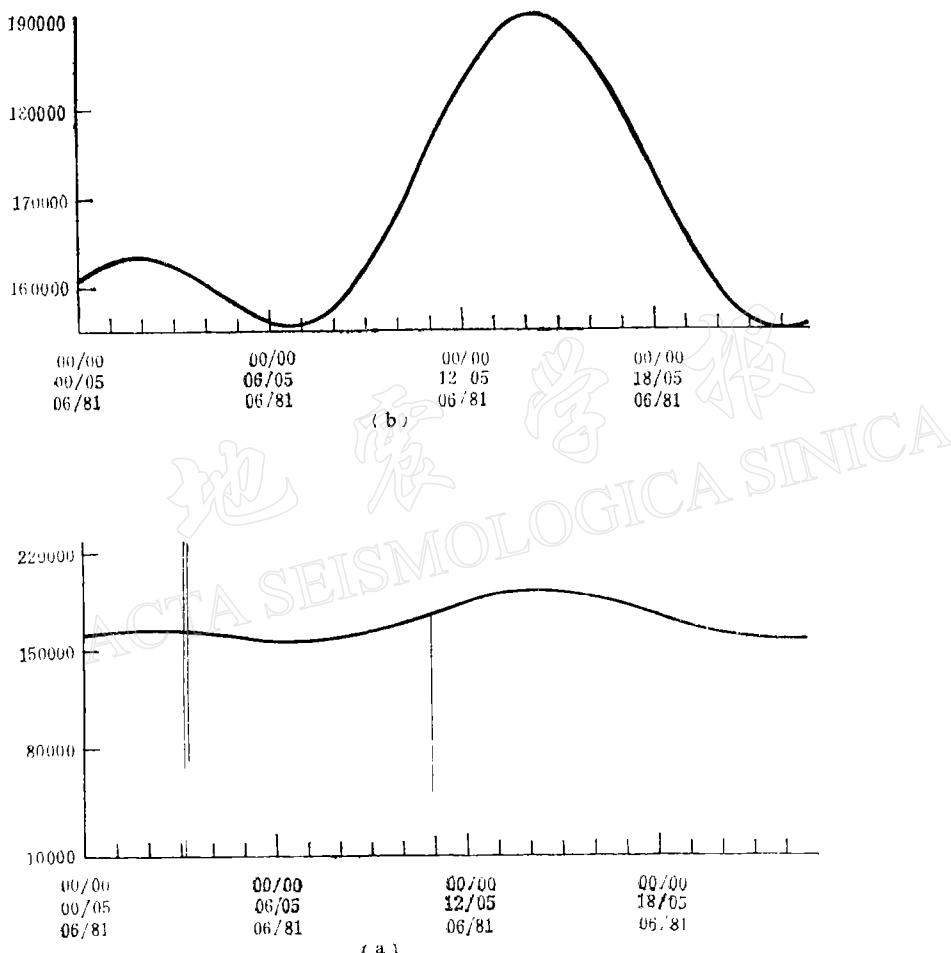


图 2 磁带数据和 PFSS 结果的比较

Comparison between tape data and results of PFSS

(a) 磁带数据(每 5s 一个样,延续 22h)

Tape data (taking a sample every 5 seconds, lasting 22 hours)

(b) PFSS 结果(每 10min 一个样,延续 22h)

Results of PFSS (taking a sample every 10 minutes, lasting 22 hours)

比较磁带数据、多项式平滑取样数据和理论潮这三者的功率谱是有意义的。在计算功率谱以前,先消除线性趋势成分,然后用(2)式标准化

$$y_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中 x_i 为取样点值, N 为取样点个数, \bar{x} 为 N 个取样点的平均值。为了减少泄漏, 用“汉明窗”作预处理[公式(3)]。

$$h_j = \begin{cases} 0.54 + 0.46 \cos \frac{\pi j}{N} & j \leq N \\ 0 & j > N \end{cases} \quad (3)$$

式中 N 为整个序列的点数, j 为某个数据点的点位。

求富里叶系数时采用(4)式

$$\begin{cases} a_j = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cos(j \cdot t_k) & j = 0, 1, \dots, (N-1)/2 \\ b_j = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \sin(j \cdot t_k) & j = 1, 2, \dots, (N-1)/2 \end{cases} \quad (4)$$

然后用(5)式求功率谱

$$\begin{cases} P_0 = a_0^2 / 2.0 \\ P_j = (a_j^2 + b_j^2) / 2.0 \end{cases} \quad (5)$$

计算结果见表 1。

表 1 功率谱分析结果 (%)
Results of power spectral analysis (%)

数 据	22 个小时, 近于日波	11 个小时, 近于半日波	7 个小时, 近于 $\frac{1}{3}$ 日波	高 频 成 分
磁带数据	64.65	28.30	1.40	5.64
多项式拟合	57.23	40.45	1.94	0.38
理论潮	57.21	40.46	1.95	0.38

把磁带数据和理论潮谱分析结果加以比较, 可以看出, 前者包含较多的高频成分, 日波和半日波有较大的畸变。用多项式平滑取样后, 频率特性大为改善, 高频成分从 5.64 降为 0.38。考虑到表 1 中不含高频成份的理论潮也有 0.38 的方差贡献, 可见这个数是在误差范围内。取样之后也消除了日波和半日波的畸变, 使谱特性与理论潮一致, 说明多项式平滑取样具有良好的滤波功能。

四、强 地 震 扰 动

图 3 和图 2 相似, 图 3(a) 也是磁带数据, 5s 一个样, 延续时间为 22h。图 3(b) 类似于图 2(b), 也是用 PFSS 后所作的曲线, 取样间距为 10min, 拟合区间为 1min, 延续时间为 22h, 所不同的是, 图 3 受了一次 8 级地震的强烈扰动, 使图 3(a) 的振幅差高达 240,000 (相对值), 从图 3(b) 可看出, PFSS 消除了部分高频, 但并没能有效地抑制强地震干扰。表 2 是功率谱分析结果。

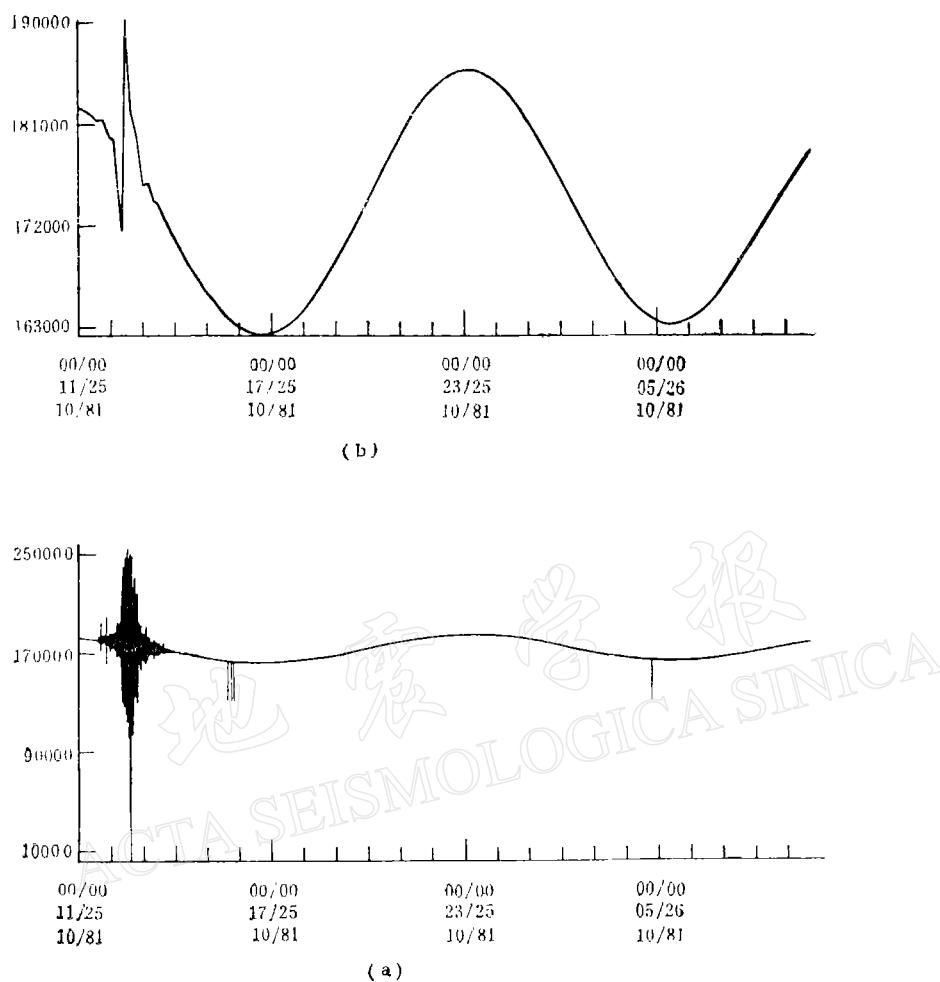


图 3 受强地震扰动的数字磁带记录和取样结果

Numeric tape records with strong earthquake noise and sampling results

(a) 受强地震扰动的数字磁带记录

Numeric tape records with strong earthquake noise

(b) PFSS 结果

Results of PFSS

表 2 含有强地震干扰的固体潮记录和理论潮的功率谱 (%)
Power spectra of earth tide records with strong earthquake
noise and that of theoretical tides (%)

数 据	22 个小时, 近于日波	11 个小时, 近于半日波	7 个小时, 近于 $\frac{1}{3}$ 日波	高频成分
磁带数据	29.28	63.08	5.47	2.17
多项式拟合	34.17	60.05	5.08	0.70
校正后	33.42	60.09	5.24	0.65
理论潮	33.31	60.77	5.26	0.66

从表 2 可以看出,多项式拟合平滑取样 (PFSS) 之后,可以改善谱特性,但远远达不到要求,原因是地震信号太强,持续时间也长。如图 4(a) 中的强地震干扰已经超过 4h,数据点的强烈的非平稳跳动导致取样后的畸变。

五、强地震扰动的消除

由于采用一般的平滑方法不能消除强地震而引起的畸变。PLAG 等曾指出,应该消除包含强地震干扰的数据,然后用低阶多项式来内插^[10]。如果只用简单的消除再内插的

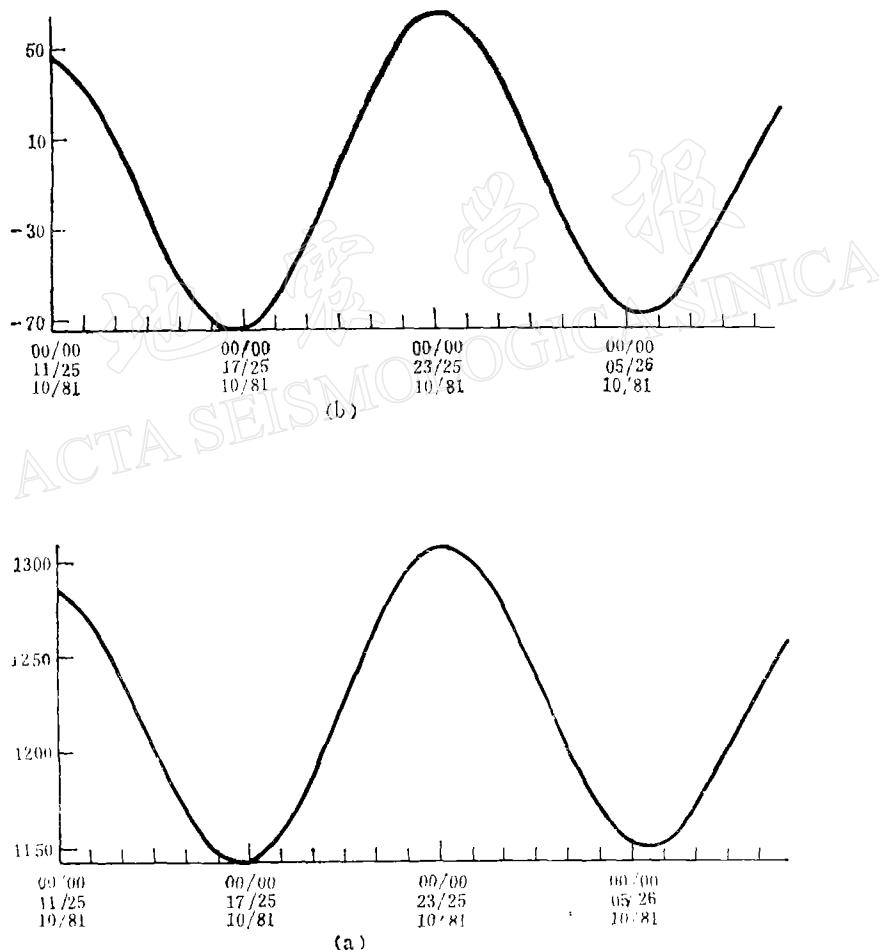


图 4 受强地震扰动的固体潮记录经校正后与理论潮的比较

Comparison between corrected curve of earth tides subjected to strong
earthquake noise and curve of theoretical tides

(a) 校正后的观测曲线

Observed curve after being corrected

(b) 理论潮曲线

Curve of theoretical tides

方法，虽然节省计算时间，但有可能把可以利用的一部分受地震尾波干扰的数据也丢掉了。

Nakai 曾多次讨论固体潮观测值的内插问题^[7-9]，他给出如下的插值公式

$$y_t = a \cdot R(t) + b \cdot \frac{dR(t)}{dt} + \sum_{j=0}^n K_j t^j \quad (6)$$

式中 $b = -a \cdot \Delta t$ ， Δt 是平均时间滞后，在标定后则 a 为平均潮汐因子， $R(t)$ 为 t 时刻的理论潮， $K_0, K_1, K_2, \dots, K_n$ 为待定系数，一般取 $n = 2$ ，把 48h 内已有的观测值作为 y_t ，可由最小二乘法求出 a, b ，及 K_0, K_1, K_2 ，然后再回代求出缺失值。陈冬生曾指出使用 Nakai 方法来剔除坏点的迭代方案，并用 2 至 3 倍的标准差作为判断是否为随机误差的依据^[11]。但一般来说，在使用这种依据之前，应对残差作正态分布检验，只有满足正态分布才能使用。但作正态分布检验是比较麻烦的。为此，本文采用如下的迭代方法。

首先确定初始不允许误差 D_0 及最终不允许误差 D_1 。如果是在标定以后再消除地震扰动，则 D_0, D_1 可以用 μGal 为单位，要求 $D_0 > D_1$ 。当然 D_0 与 D_1 的选择有一定人为性，需要预先对记录图形作些分析。笔者曾取 D_0 为 $32\mu\text{Gal}$ ， D_1 为 $1\mu\text{Gal}$ 。

1. 对某个 48h 段内的数据作一次 Nakai 拟合，求出参数 a, b ，及 K_0, K_1, K_2 ；
2. 回代入(6)式，求出对应时刻的固体潮改正值；
3. 比较观测值与改正值，凡误差绝对值大于 D_0 者，用改正值取代观测值；
4. 将 D_0 与 D_1 比较，如果 D_0 大于 D_1 则 $D_0/2$ 送入 D_0 ，重复步骤 1，直到 D_0 小于或等于 D_1 则迭代结束。

对图 3(b) 所用的数据作了上述处理后，得到观测值校正曲线 [图 4(a)]。图 4(b) 为理论潮，可以看到两者很接近。

表 2 的最后一栏，给出校正后的谱分析结果。可以看到，它与理论潮的结果几乎是一样的。

笔者与 E. Groten 教授、K. P. Schwarz 教授和陈益会副教授进行了有益的讨论，在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 陈冬生、李瑞浩、傅兆珠、翦大西，固体潮观测数据中错误数据的自动识别与改正，地壳形变与地震，4，42—46，1984。
- [2] Becker, M. De, B. Ducarme, Sampling and pre-processing of tidal data of one minute interval, *BIM*, 91, 5992—5996, 1984.
- [3] Godin, G., The analysis of tides, University of Toronto Press, 1972.
- [4] Jettsch, G., Automatic treatment and pre-processing of tidal data recorded at 1 min. intervals, *BIM*, 85, 5415—5424, 1981.
- [5] 李鸿吉、薛恩、吴勇强，最佳数字滤波器及其应用，地震地质，1，71—89，1979。
- [6] Melchior, P., The tides of the planet earth (second edition), Pergamon Press, Oxford, 1983.
- [7] Nakai, S., Pre-processing of tidal data, *BIM*, 75, 4334—4340, 1977.
- [8] Nakai, S., Revised method of the pre-processing of tidal data, *BIM*, 81, 4955—4961, 1979.
- [9] Nakai, S., On the interpolation of interruption in tidal record, *BIM*, 85, 5457—5466, 1981.
- [10] Plag, H. P., and Jahr, t., On processing of earth tidal data, *BIM*, 89, 5759—5786, 1983.

RE-SAMPLING OF TIDAL TAPE RECORDS AND ELIMINATION OF STRONG EARTHQUAKE NOISE

LI HONGJI

(*Institute of Geophysics, State Seismological Bureau*)

Abstract

In this paper, the re-sampling of tidal tape data at 5-second intervals and the method of elimination of strong earthquake noise are discussed.

The polynomial fit smooth sample (PFSS) method is given in this paper. The PFSS synchronizes tape reading, smoothing and sampling. The memory of the computer has already had sampling results in the light of the given interval as soon as the tape reading finishes. Since format translation and preprocessing are performed for the relevant points, computer time is minimized. And since only sampling results are stored, less computer space is required. So the PFSS is useful for processing of tidal tape data of small interval and long duration.

In order to check the results of the PFSS, analysis of power spectra is used. The calculated example shows that the PFSS has a good filtering function.

Nakai method is used to eliminate distortion caused by a strong earthquake and an iterated procedure is given. The calculated results are checked by analysis of power spectra, too. The results of spectral analysis of observed data which have been corrected for earthquake noise are similar to the results of theoretical tide analysis.