

长江口附近验潮站海平面资料的 周期图分析和周期信号检验*

段 华 琛

(上海地震局)

文章介绍了作者近年来在海平面变化中分离周期因素影响所做的一些工作。

一、周期图计算及制图程序

海平面变化和沿海地区较大地震的发生有着一定的关系,因此,海平面资料作为地震形变前兆研究的一种手段逐渐得到应用。

在不同时期内取潮汐水位的平均高度,就得到不同时期的平均海平面。由于各种天文周期引潮力的影响、地球绕日周年转动造成地球表面物理因素周年变化以及地球自转轴极移(约十四个月左右)的周期变化等,引起海平面高度产生各种周期性的变化;而地球表面气象、水文、地壳变动以及地球自转速度等的变化,又引起海平面高度产生复杂的非周期的变化。我们要了解地壳变动的信息,得到地壳变动所引起海平面变化的部分,则必须排除其它各种因素的干扰。

潮汐资料的分析处理,一般是采用调和分析方法。

将潮汐或海平面资料作为时间序列,对该时间序列进行傅里叶变换得到频谱序列。根据傅里叶变换的性质,如果时间序列存在最高频率因子 f_c ,为使傅里叶变换结果能完全恢复时间序列,要求对时间序列的采样频率 $f_s \geq 2f_c$ 。另外,为了使频谱分析能在足够宽的频带上了解时间序列的频率结构以及尽量减少随机干扰的影响,要求时间序列的长度越长越好。考虑到工作中的实际需要和可能,我们以日平均海平面为采样数据进行频谱分析作周期图。

对数据个数为 $2M$ 的快速傅里叶变换方法(FFT)已被广泛运用。可是当序列长度不为

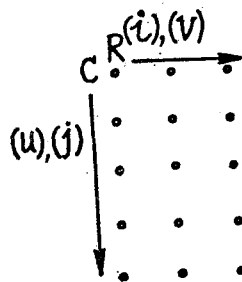
$2M$ 时,则需舍弃部分观测值,或将不足的部分冲零来解决。这样做的结果对逼近实际观测序列的情况显然是不利的。因此这里采用将序列长度 N 拆成任意因子的乘积进行傅里叶变换的方法,以便尽可能保留较多的观测数据,使周期图结果能较好地逼近实际情况。

离散傅里叶变换公式:

$$A(i) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{tJ2\pi ki/N} = \sum_{k=0}^{N-1} \left[x(k) \cos t \frac{2\pi ki}{N} + Jx(k) \sin t \frac{2\pi ki}{N} \right]$$

式中 $J=\sqrt{-1}$, $t=\pm 1$ (正、逆变换), i, k 各为频域和时域序号。

计算原理(见下图)步骤如下:



1. 将序列长度 N 拆成二因子的乘积: $N=R \cdot C$ 如 $15=5 \times 3$, 将一维序列拆成二维:

$$A(i, j) = A(ic + j)$$

2. R 个点的

FT变换(每行 R 方向的傅里叶变换):

$$A_1(i, j) = f_R(t) \sum_{i=0}^{R-1} x(ic + j) \times e^{tJ2\pi i v c / R c}$$

式中 $v=0, 1, 2, \dots, R-1; j=0, 1, \dots, C-1$

* 华东师大沈焕庭副教授、胡方西先生及同济大学李国治副教授、上海交通大学谭炳麟先生对本工作曾予以帮助,特此致谢。

$$t=+1, f_R=1; t=-1, f_R=\frac{1}{R};$$

令 $p=ic+j$ (时域序号按列排列)。

3. 对每行分别进行变换, 乘上因子 $e^{tJ2\pi jv/N}$;

$$A_2(v_1j)=f_R(t) \sum_{i=0}^{R-1} x[ic+j] \\ \times e^{tJ2\pi v(ic+j)/N} \quad (v=0,1,2,\dots, \\ R-1; j=0,1,\dots, C-1)$$

4. C(列)方向变换:

$$A_3(v_1u)=f_C(t)f_R(t) \sum_{j=0}^{C-1} \\ \times \left\{ \sum_{i=0}^{R-1} x[ic+j] \times e^{tJ2\pi v(ic+j)/N} \right\} \\ \times e^{tJ2\pi u j R / CR} = f_C(t) f_R(t) \sum_{j=0}^{C-1} \sum_{i=0}^{R-1} \\ x[ic+j] \times e^{tJ2\pi (v(ic+j)+u j R) / N}$$

式中 $v=0,1,\dots, R-1; u=0,1,\dots, C-1$;

$$t=+1, f_C(t)=1; t=-1, f_C(t)=\frac{1}{C}。$$

5. 对每列分别进行变换, 乘上因子 $e^{tJ2\pi i u R C / N}$;

$$A_3(v_1u)=f_C(t) f_R(t) \sum_{j=0}^{C-1} \times \left\{ \sum_{i=0}^{R-1} \right. \\ \left. x[ic+j] e^{tJ2\pi v(ic+j)/N} \right\} \\ \times e^{tJ2\pi u j R / N + tJ2\pi u i R C / N} \\ = f_C(t) f_R(t) \sum_{j=0}^{C-1} \\ \times \left\{ \sum_{i=0}^{R-1} x[ic+j] e^{tJ2\pi v(ic+j)/N} \right\} \\ \times e^{tJ2\pi u R (j+ic) / N}$$

上式中 e 的指数:

$$tJ2\pi v(ic+j)/N + tJ2\pi u R (j+ic)/N \\ = tJ2\pi (ic+j)(uR+v)/N$$

$$A_3(v_1u)=f_C(t) f_R(t) \sum_{j=0}^{C-1} \sum_{i=0}^{R-1} \\ \times x[ic+j] \times e^{tJ2\pi (ic+j)(uR+v) / N} \\ = f_N(t) \sum_{p=0}^{N-1} x(p) \times e^{tJ2\pi p(uR+v) / N}$$

$$6. A(v_1u)=A(uR+v);$$

从 1—6 步完成了时间序列的傅氏变换。显然, 计算时经过转置, 时域按列排列而 FT 变换是按行进行的。

上述 5 中乘上:

$e^{tJ2\pi i u R C / N} = e^{tJ2\pi i u N / N} = 1$ (因 i, u 都是整数) 所以只需进行 1—4 步运算。实际上是对第四步

$$A(v_1u)=f_C(t) f_R(t) \sum_{j=0}^{C-1} \\ \times \left\{ \sum_{i=0}^{R-1} x[ic+j] \times e^{tJ2\pi v(ic+j) / N} \right\} \\ \times e^{tJ2\pi u j R / N}$$

中 $\{ \}$ 括号内进行变换, 然后按 1—4 步重新运算构成层次。分解因子 $N=R \cdot C$, R 为素数, 开始时 C 为合数, 不断继续分解 $C, C_1=R_2 C_2, C_2=R_3 C_3, \dots$ 每次(层)分解组成新的 R, C 二维数组, 逐层逐组按第四步公式在 $\{ \}$ 内进行变换, 分解到最后 $C=1$, 则分解运算完毕。从 1 和 6 等式 $A(v_1u)=A(vC+u) \rightarrow A(v_1u)=A(uR+v)$ 知其由二维变成一维需经过重排转置方能得到实际的频域序列。

在实际计算中, 我们还把一个序列拆成奇偶两部分分别冲入实部和虚部构成复时间序列进行变换以进一步提高运算速度。

二、周期图计算结果

对长江口附近地区四个验潮站进行频谱计算, 其中测站 2 有 32 年资料, 测站 4 有 11 年资料, 测站 1 和 3 分别有 9 年资料。计算主要长周期分量在周期图上都出现谱峰值。结果见表 1, 2。

表 1

(单位: 公分)

周 期	9 天左右	半朔望月	近点月	$\frac{1}{3}$ 年	$\frac{1}{2}$ 年
测站 1	0.79	2.62	0.64	0.97	1.50
测站 2	0.40	3.23	0.96	0.76	1.81
测站 3	0.41	1.08	0.73	1.31	1.10
测站 4	0.69	2.34	0.79	1.30	1.59

表 2

(单位: 公分)

周 期	年	禹德勒周期	9 年左右	19 年左右
测站 1	6.65	0.51	0.83	
测站 2	10.47	0.60	0.36	0.35
测站 3	7.16	1.24	1.75	
测站 4	7.34	0.63		

上表数据除 9 年周期的振幅值直接用傅里叶变换计算外, 其余周期振幅值计算都经过哈宁 (Hanning) 窗函数处理。测站 3 由于资料系列短等因素, 误差较明显。当观测资料较长时, 情况可望得到改善。

上述计算结果和国外学者按同一纬区实测资料计算或推算的数据^[1,2]大部分较接近。其中仅近点月周期的振幅值表现有明显差异, 这很可能是由于特定的地理条件对频率响应带来的影响。

三、海平面变化的周期信号检验

对海平面资料作傅里叶变换, 结果在许多频率上出现峰值。为了消除周期因素对海平面的影响, 需要检验这些峰值中实际存在的周期分量, 以便进行滤波, 得到消除周期性影响之后的海平面。

对于实际存在的周期分量, 其频谱值是确定性的。因此, 一般对于各验潮站资料在不同时间区间上计算得到的功率谱尖峰将趋于一致。而随机信号本身存在固有的不确定性, 使平稳随机信号的功率谱密度计算将显示其离散性。所以, 如果功率谱峰值是平稳的窄带随机信号, 对各站不同时间区间计算的功率谱尖峰将表现出分散性。

随机信号功率谱的标准化均方误差为:

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{B \cdot T_a} \quad (1)$$

式中, B 为随机信号分析处理带宽, T_a 为估算功率谱密度值的平均时间。对于固定的 T_a , 当分析带宽 B 值增大时, 显然其标准化均方误差会随之而减小。这些就构成周期性检验定量分析方法 (即方差 χ^2 分布检验法) 以及定性检验

方法的理论基础。

χ^2 分布检验要求其样本数据服从正态分布律, 均值为 0, 方差为 1。因此先将各站资料零均化, 并用偏态系数和峰态系数进行正态性检验。然后, 对符合正态分布律的测站资料计算功率谱密度值, 并对其每个尖峰用定量分析进行周期性检验, 步骤如下:

1. 把时间长度为 T 的采样记录分成等长的 K 段, 则每段的平均时间为 $T_a = T/K$, 分段数 K 应满足 $K < 0.1BT$ 。

2. 根据已决定的分析处理带宽 B , 分别对 K 段子样数据进行傅里叶变换计算其功率谱, 先将采样数据零均化:

$$\bar{x} = \sum_{k=1}^N x_{k/N} \quad x_k^1 = x_k - \bar{x} \quad (2)$$

离散傅里叶变换形式:

$$X_K = \sum_{n=0}^{N-1} x_n^1 e^{-j \frac{2\pi K n}{N}} \quad (3)$$

为了抑制由于时域截断所引起的泄漏效应, 采用哈宁窗函数抑制截断函数的旁瓣效应。哈宁窗函数为

$$u(n) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \frac{2\pi n}{N} \quad (4)$$

功率谱计算为

$$G_x(f) = \frac{2h}{N} \left| X(f, T) \right|^2 \quad (5)$$

对功率谱作哈宁窗比例因子调整为

$$G(f) = G_x(f) / d_G \quad (6)$$

对于哈宁窗 $d_G = 0.375$ 。

3. 根据欲检验的那个尖峰的频率, 可在 K 个功率谱图上得到一组 K 个离散功率谱密度估算值 G_i 。

4. 用下列公式算出该组功率谱估算值的实际的标准化均方误差 $\hat{\varepsilon}^2$:

$$\hat{\varepsilon}^2 = \frac{\frac{1}{K-1} \left\{ \sum_{i=1}^K \hat{G}_i - \frac{1}{K} \left[\sum_{i=1}^K \hat{G}_i \right]^2 \right\}}{\left[\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \hat{G}_i \right]^2}$$

$$= \frac{K}{K-1} \left\{ \frac{K \sum_{i=1}^K \hat{G}_i^2}{\left[\sum_{i=1}^K \hat{G}_i \right]^2} - 1 \right\} \quad (7)$$

式中 $\hat{G}_i$ 为第 i 段功率谱密度的估算值 $i=1, 2, \dots, K$ 。

5. 在假设采样记录为随机的情况下, 用式 (1) 计算该组功率谱估算值标准化均方误差的理论值 ε^2 。

6. 算出实际的标准化均方误差与理论的标准化均方误差之比:

$$R_e = \frac{\hat{\varepsilon}^2}{\varepsilon^2} \quad (8)$$

若 R_e 在统计意义上等效于 1, 则被研究的功率谱密度曲线的那一个尖峰可看成是窄带随机振动响应的结果。若 R_e 明显地小于 1, 则该峰看成是振动响应中周期分量的结果。而判定 R_e 是等效于 1 还是明显地小于 1 的准则如下:

$$R = \frac{\chi^2_{(K-1); (1-\alpha/2)}}{K-1} \quad (9)$$

若 $R_e > R$, 则 $R_e = 1$; 若 $R_e < R$, 则 $R_e < 1$ 。式中 $\chi^2_{(K-1); (1-\alpha/2)}$ 为有 $K-1$ 自由度的 χ^2 分布, 可从 χ^2 分布表按其自由度和给出的显著水平 α 查得。K 为所用的分段估算次数; α 为检验用的显著水平, 也即把事实上代表窄带随机信号尖峰当成代表正弦信号尖峰的这种取伪的错断概率。

在定量统计判断中, 也存在着把实际上代表正弦信号的尖峰错当成代表窄带随机信号的尖峰这种弃真错断的可能性。当显著水平 α 变小时, 这种弃真错断的可能性就增加。当分段数 K 变大时, 这类可能性就减小。所以只要满足 $K < 0.1BT$ 这个条件, 尽可能多地分段估算, 这可使取伪和弃真的错断危险性减少到最低程度。

鉴于潮汐变化规律年以上周期已经明确, 而海平面资料长度也有限, 所以这里主要检验年以下的周期分量。

对符合正态分布律的测站 2 的 32 年资料, 分析处理带宽取 $B=1/369$ (周/天) ($B=1/364$ 和 $B=1/365$ 相比, 带宽相差甚微, 但对于拆成

任意因子乘积的傅里叶变换来说, 取 $B=1/364$ 计算时间可以大大节省)。分段数 $K < 0.1BT$, 取 $K=3$, 分成三段。

按上述定量检验方法的计算步骤和数学模型编程进行电算。对测站 2 周期分量检验结果, 年以内周期功率谱峰值共 57 个, 对于检验显著水平 $\alpha=0.10$, 查表及计算理论比值 R 为 0.105。计算得到各个频率上的比值 R_e , 其中满足条件 $R_e < R$ 的周期分量有年周期分量 ($R_e=0.10$), 近点月周期 ($R_e=0.04$), 半朔望月周期 ($R_e=0.06$), 7.7 天周期 ($R_e=0.05$), 此外还有 8.0 天周期 ($R_e=0.01$), 5.4 天周期 ($R_e=0.03$)。

由于定量统计判断中存在着错断的可能性, 加上海平面资料时间长度有限, 使频谱计算一些环节的处理中, 不可能都达到应有的要求, 如对样本函数服从正态分布律的要求, 对分析处理带宽的要求, 对数据计算的随机误差的精度要求等等, 不可能同时兼顾周到, 因此定量检验方法往往不能完全达到预期的目的。鉴于海平面变化的周期分量是确定性的, 其非周期部分是随机分散的, 所以除了采用上述定量方法以外, 又结合采用定性分析的方法, 分别进行计算, 综合分析, 最后得出实际存在的周期分量。

功率谱标准化随机均方误差 $\varepsilon^2 = \frac{1}{BT}$ 。我

们对海平面资料分段作功率谱计算然后进行总

体平滑, 则 $B = \frac{K}{T}$, $\varepsilon^2 = \frac{1}{BT} = \frac{1}{K}$ 。对于

较大的 K 值, 功率谱的标准化均方误差会显著减小, 计算的共谱峰值可信度较高; 对于周期分量而言, 一般从不同站计算得到的频谱, 在该频率上应有明显的峰值。因此, 又对其它三站取 $B=1/364$ (周/天), 分段计算功率谱, 然后进行总体平滑; 对于较小的标准化均方误差, 取出共谱峰值。另外, 为了提高谱峰值分辨率又采用窄的分析带宽 (取 $B = \frac{1}{T}$) 用相同的序列长度 (或是其整数倍), 采用哈宁窗函

数计算四个站频谱振幅值,对其共谱峰值综合考虑分析,最后得到的周期分量,除了前面已经提到的18.61年周期、8.85年周期、14个月左右周期外,还有年周期、半年周期、 $\frac{1}{3}$ 年周期、近点月周期(27.55天)、24.1天周期、半朔望月周期(14.76天)、13.66天周期、9.6天周期及7.7(7.8)天周期。

在有关长江口区域的潮汐预报实践中,为了提高潮汐预报的精度,曾经探索采用一些分潮模式来进行潮汐预报,如63, 128, 163和254分潮模式。但是所有这些分潮模式都未包括上述检验的周期信号中9.6天周期分量。我们用63分潮加上9.6天周期的分潮(即64分潮)对测站2的1969, 1970, 1973, 1975, 1976, 1978等6年资料作了分析和推算。用该64分潮推

算潮汐所得的月均方根误差和63分潮推算结果进行比较,除了1978年由于径流量为36年中最小值属径流异常年份外,在其他5年中,大部分月份(约70%),用64分潮推算的精度都要高于63分潮推算的精度。显然,对于受径流影响小的其它沿海验潮站,64分潮推算的潮汐精度,可以预期将更普遍地得到提高。

主要参考文献

- [1] Lisitzin, E., 1974. SEA LEVEL CHANGES. CHAPTER 2.
- [2] Holmes, J. T., 1972. FOURIER TRANSFORM PROGRAM FOR ANY NUMBER OF DATA POINTS. CHAPTER 1.
- [3] 布赖姆, E. O., 1979. 快速傅里叶变换。上海科技出版社。第12—162。
- [4] 纽兰, D. E., 1980. 随机振动与谱分析概论。机械工业出版社。第72—134。

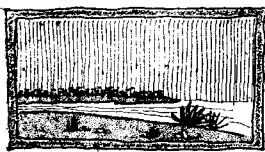
ANALYSING PERIODGRAMS AND INSPECTING PERIODIC SIGNAL OF SEA LEVEL DATA SUPPLIED BY THE TIDE-GAUGE STATIONS NEAR THE MOUTH OF THE YANGTZE RIVER

Duan Huachen

(Shanghai Seismological Bureau)

Abstract

This paper introduces my recent work in separating the influences of periodic factors in sea level changes.



——简讯——简讯——简讯——简讯——简讯——简讯——简讯——简讯

中国海岸河口学会第二届学术年会在上海举行

中国海洋湖沼学会海岸河口学会第二届学术年会于1981年12月29日至1982年1月4日在上海举行。参加这次年会的有来自中国科学院、高等院校、国家海洋局、交通部、地质部、水利部及沿海各省市78个单位的137名专家及工程技术人员。

大会共收到论文126篇。这些论文反映了近年来我国海岸河口学界在党的十一届三中全会路线指引下,紧密结合沿海经济建设中的重大课题所取得的成果。其中围绕海岸带资源综合调查利用、沿海港口航道建设、河口治理等方面所进行的水文、泥沙运动、地貌演变及水流计算方法,以及大米草推广应用等方面的研究成果,都直接推动了生产建设的发展,正取得良好的经济效益。此外,对海面升降、海岸变迁、河口拦门沙形成过程、潮汐通道稳定性、河口环流和细颗粒泥沙絮凝等理论研究方面,也从不同角度服务于当前国民经济的需要。

学部委员、学会名誉理事长任美铎,理事长、河口学家陈吉余及30余名教授、副教授出席了会议。代表们就当前我国海岸、河口研究趋势、国外研究动向、海面升降、海岸变迁、现代沉积和海岸带资源开发等方面作了学术报告。会议还就今后海岸河口研究如何进一步为国民经济发展服务而交流了经验。

(虞志英)