

基于希尔伯特-黄变换的海滩碎波带 水体波动特征分析*

王扬圣, 陈子燊, 刘萌伟

(中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275)

摘要: 介绍了HHT原理及其端点效应与正交性, 分析了台风过程中碎波带水体波动特征。结果表明, 碎波带波浪在台风期间波能增大且向低频转移, 台风过后波能减弱且向高频转移; 海滩地下水波动主要受潮汐涨落影响, 波动周期可能受台风增水影响; 台风与天文大潮耦合导致海滩地下水位奇异性波动。

关键词: 希尔伯特-黄变换; 海滩碎波带; 水体波动

中图分类号: P512.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 01-0112-04

海滩碎波带是近岸区水动力作用和地形演变高度耦合的典型区域, 由于强烈的波-波非线性相互作用、水体与地形相互作用等, 形成了复杂的水体运动形式, 如: 各种形式的边缘波、周期两倍于入射波的亚谐波、长重力波和剪切波及沿岸净环流等。在极端波况下, 水体主要波动能量向低频转移, 低频能量可能超过入射波频域的波浪作用, 是海岸与海滩侵蚀的重要动力机制^[1-3]。海滩沙粒物质构成对前滨滩面冲流过程的下渗作用具有天然滤波器的效应, 一般可消除与波浪水体有关的波动特征, 因此通常海滩地下水位振荡过程主要反映了当地潮汐水位波动的影响。有关研究指出, 随潮汐涨落地下水的下渗和排出也是海滩地形侵蚀堆积过程的因素之一^[3-4], 波况变化过程中地下水位的变动特征是值得关注的。鉴于海滩碎波带水体波动呈现出高度的非线性与非平稳性特征, 近年来, HHT方法在海洋、大气、地震等领域有广泛应用^[5-11]。本文尝试采用近10a来发展出的适用于非线性与非平稳性过程的希尔伯特-黄变换(HHT)方法, 对不同波况下现场观测的碎波带波动和海滩地下水位波动特征加以分析。

1 希尔伯特-黄变换

1.1 经验模态分解

内在模函数(IMF)求取3个步骤: ①找出原序列 $x(t)$ 的各个局部极大值 $x_{\max}(t)$ 和极小值 $x_{\min}(t)$; ②求瞬时平均值 $M(t) = \frac{1}{2}[x_{\min}(t) + x_{\max}(t)]$; ③求类距平值 $H(t) = X(t) - M(t)$ 。

对于不同的数据序列, $H(t)$ 可能是内在模函数, 也可能不是。每个固有模态函数都必需满足2个条件: ①极点数与零点相等或者相差为一; ②在任意点, 极大值构成的包络和极小值构成的包络平均值为零。不满足条件则把 $H(t)$ 当作原序列, 重复以上步骤, 直至满足内在模函数的定义, 求出内在模函数为止。同理, 将原始信号分解成有限个内在模函数之和。

1.2 Hilbert变换

对每个内在模函数进行Hilbert变换, 求出瞬时频率, 得到Hilbert谱。Hilbert变换定义: $Y(t) = \frac{1}{\pi} p \int_{-\infty}^{\infty} \frac{IMF(\tau)}{t - \tau} d\tau$, 式中 p 表示积分的柯西主值。

定义 $IMF_n(t)$ 的解析信号 $z(t)$ 为: $z(t) = IMF(t) + iY(t) = a(t)e^{i\theta(t)}$, 其中 $a(t) = [IMF^2(t) + Y^2(t)]^{\frac{1}{2}}$ 和 $\theta(t) = \arctan \frac{Y(t)}{IMF(t)}$, 分别为解析信号 $z(t)$ 的瞬时振幅和瞬时相位, 进一步可以定义瞬时频率、平均周期和平均振幅: $\omega(t) = d\theta(t)/dt$, $\bar{T} = \sum \frac{1}{\omega(t)}/t$, $H = \sum a(t)/t$ 。

1.3 端点效应与正交性

端点效应是应用经验模态分解的瓶颈问题, 为此提出了多种解决方法, 如镜像对称延拓方法^[8]、神经网络方法^[9]、镜像闭合法和极值点延拓法^[10]、多项式拟合算法^[11]等。本文尝试采用镜像对称延拓方法, 结果表明该方法简便且有效, 但延拓长度

* 收稿日期: 2007-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40576041)

作者简介: 王扬圣(1981年生), 男, 研究生; 通讯联系人: 陈子燊; E-mail: eesczs@mail.sysu.edu.cn

如何确定成为难点，延拓过长则内在模函数增多失真，少则达不到抑制效果。在多次试验后发现长信号两端延拓长约为总信号长度 1/10，短信号适当加长则能明显解决了边界对于经验模态分解过程中的上冲和下冲现象，而且内在模函数不失真。

经验模态分解处理非线性非平稳信号，从理论上不能完全证明其正交性。经验模态分解过程中，每个 IMF 分量都是上次分解的剩余信号与其均值曲线的差，从实际意义上讲这个 IMF 分量与均值曲线是局部正交的^[6]： $(x(t) - x(t)) * x(t) = 0$ ， $IO_{Jg} = \sum_i \frac{c_f c_g}{c_f^2 + c_g^2}$ ，根据两式计算了 26 个水体波动信号，得到正交系数的算术平均值仅为 0.006，可认为经验模态分解是正交分解。再者，正交性对于处理非线性非平稳信号没有太大物理意义^[5]。

2 海滩碎波带水体波动特征分析

2.1 资料

研究区域位于粤东岸段碣石湾西部的后江湾海滩，海区潮汐为不正规日潮混合潮，平均潮差仅 0.84 m。观测时间为 2006 年 8 月 2 - 16 日，经历了大小潮，10 日为天文大潮，6 号台风“派比安”和 9 号强风暴“宝霞”接连而来，对所观测区域影响很大，观测区域连降大暴雨。观测期间，在粤东后江湾海滩碎波带安置一台 S4ADW 波流仪，测量间隔为 0.5 s；并在滩面冲流带打一口探井，井底安置 DIK-610A-CI 水位计记录地下水位，测量间隔为 1 min。

2.2 碎波带波浪特征

本文仅选择 0606 号台风期间及台风后两时段

波列各 6 000 个记录，进行经验模态分解，分解后所得 IMF 分量分别如图 1 与图 2，并计算各 IMF 分量的平均周期与平均振幅，如表 1。

一般而言，各个 IMF 分量分别包含了信号从高到低不同频率段的成分，每一频率段所包含的频率成分都是不同的，且随信号本身的变化而变化。由于强烈的波 - 波非线性相互作用、水体与地形相互作用等，碎波带水体运动形式变得极其复杂，HHT 方法有效地将复杂的非平稳平线性的波记录分解成不同波段波动过程，有助于分析不同波况下碎波带水体波动特征。

表 1 Hilbert 变换后 IMF 的统计特征值

Tab. 1 Statistical characteristic values of intrinsic mode functions derived by using Hilbert transform

碎波带波动记录				滩面地下水位	
台风期间		台风后		平均振幅 cm	平均周期 min
平均振幅/m	平均周期/s	平均振幅/m	平均周期/s		
				3	3
0.08	2.5	0.04	2	2	5.1
0.096	5	0.026	4	1.5	8.28
0.094	10	0.018	8	1.4	13.62
0.11	20	0.017	15	1.5	23.22
0.07	38	0.009	31	17	39.42
0.05	75	0.006	58	58	64.8
0.03	173	0.008	136	12.9	121.2
0.03	351	0.003	228	69.8	852
0.02	1030	0.007	903	51	1704
				30	5940

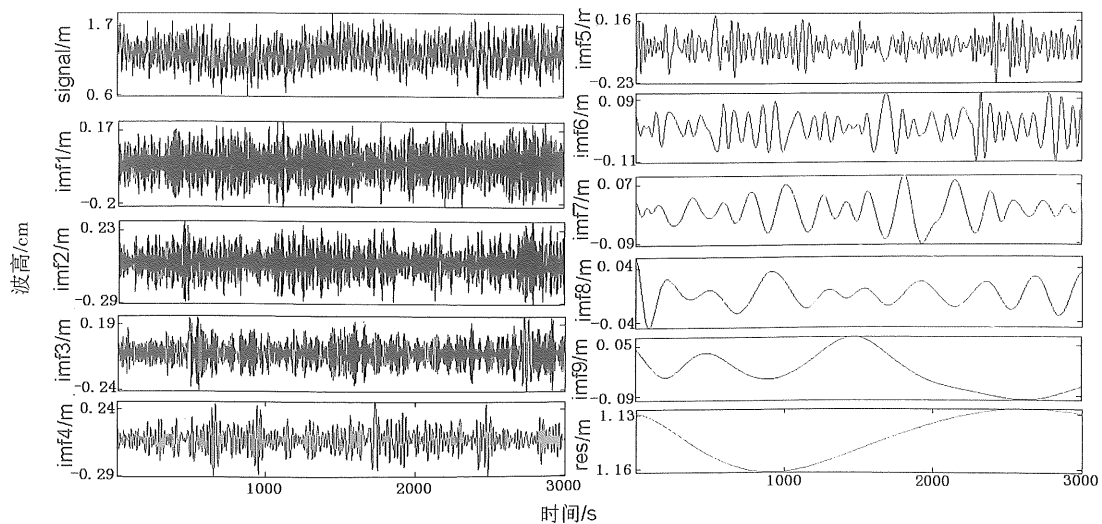


图 1 台风期间波记录 EMD 分解的 IMF 分量

Fig. 1 Intrinsic mode functions of waves derived from EMD in Typhoon

由图 1 与表 1 台风期间波记录的 IMF 统计特征值可判断, 台风过程中, 碎波带波记录的 IMF4 分量平均振幅最大, 其平均周期为 20 s, 即长重力波段波能最大。在高频段的 IMF2 与 IMF3 分量平均振幅也较大, 是由于台风影响区域降暴雨, 风浪增大, 因此碎波带波浪高频波段能量也较大。由图 2 与表 1 台风后波记录的 IMF 统计特征值可判断, 台风过后, 碎波带波记录的 IMF1 分量平均振幅最大, 且 IMF 分量平均振幅随平均周期的增大而减小, 即波能主要集中于高频波段。与台风中波记录相比, 台风后波记录各 IMF 分量的平均振幅均减小, 即碎波带波能随台风影响减弱而减小, 且能量向高频波段转移。

2.3 海滩地下水位波动特征

采用 HHT 方法对海滩地下水位进行分解, 得

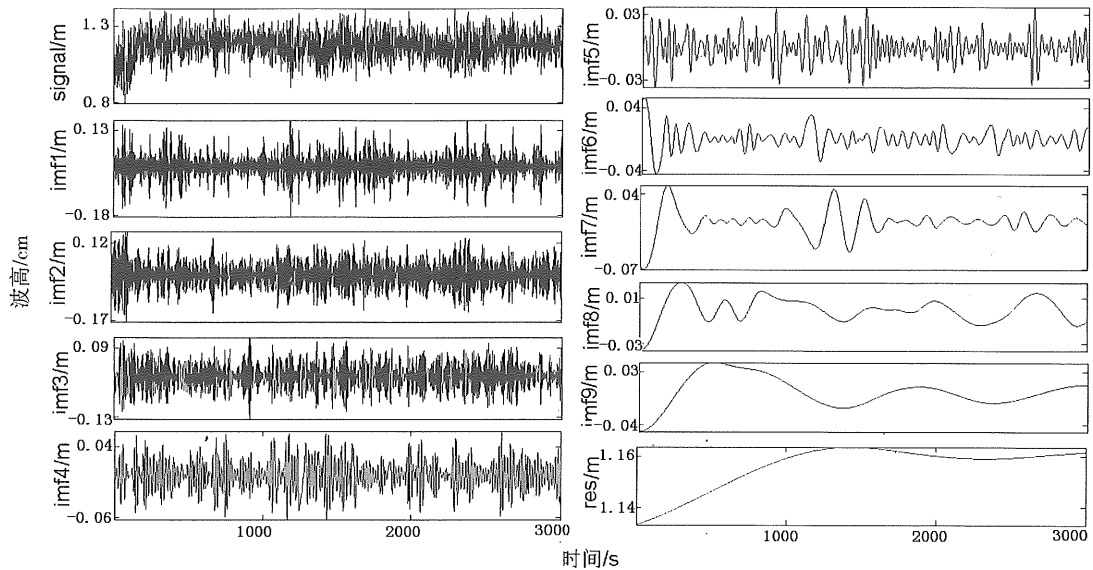


图 2 台风后波记录 EMD 分解的 IMF 分量

Fig. 2 Intrinsic made functions of waves derived from EMD after Typhoon

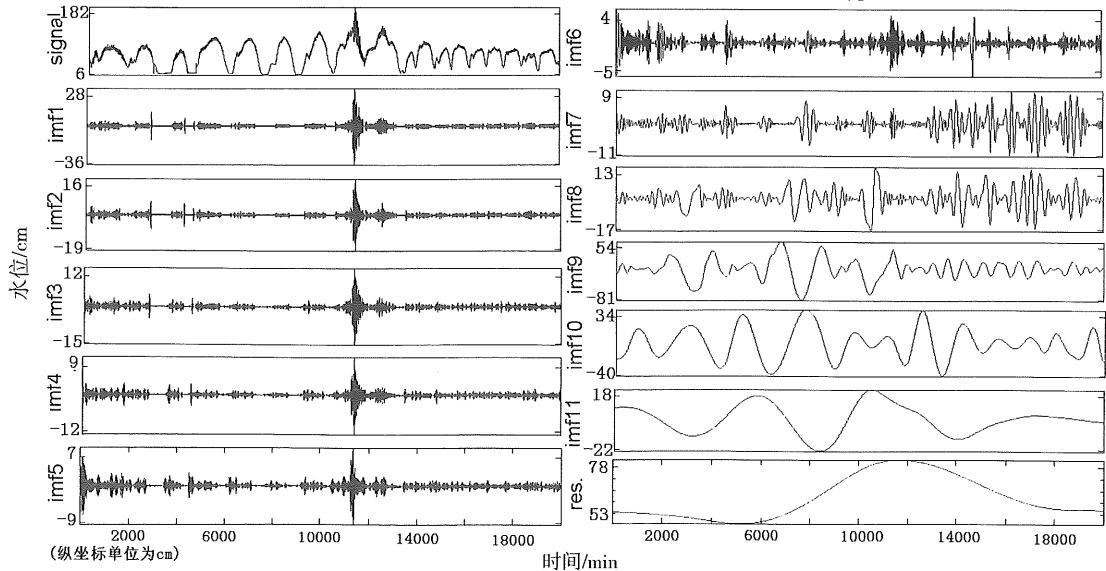


图 3 地下水位 EMD 分解的 IMF 分量

Fig. 3 Intrinsic made functions of groundwater level derived from EMD

IMF 的统计特征值 (表 1) 及分解后的 IMF 分量 (图 3)。由图 3 与表 1 中地下水位 IMF 分量统计特征值可知, IMF9 分量的平均振幅最大, 平均周期为 852 min (14.2 h), 接近半日分潮周期; IMF10 平均振幅也较大, 平均周期为 1 704 min (28.4 h), 接近全日分潮周期, 即滩面地下水位波动主要受半日分潮及全日分潮影响, 但波动周期可能受台风增水影响。信号趋势项将潮汐由小潮 - 大潮 - 小潮的波动过程有效表示出来。

由图 3 地下水位分解的 IMF1 - IMF6 分量可判断, 在 11 000 ~ 13 000 min (即 10 日, 0609 号台风、天文大潮) 存在明显奇异性信号。究其原因, 认为台风作用增水则破波点位置向岸移动, 波浪直接拍打岸滩, 地下水位波动增强, 从而出现奇异信

号。在 0 ~ 2 000 min (即 2 日, 0606 号台风) 也出现地下水位较大波动, 但其奇异性并不明显。因此, 台风与天文大潮耦合导致海滩地下水位奇异性波动。

3 结论

采用 HTT 方法, 对台风过程中实测的碎波带波动记录及滩面地下水位进行分析, 得到如下结论:

(1) 碎波带波浪在台风期间波能增大且向低频转移, 台风过后波能减弱且向高频转移。

(2) 海滩地下水波动主要受潮汐涨落影响, 波动周期可能受台风增水影响。

(3) 台风与天文大潮耦合导致海滩地下水位奇异性波动。

参考文献:

- [1] BEACH R A, STERNBERG R W. Suspended sediment transport in the surf zone; responses to cross-shore infragravity motion[J]. *Marine Geology*, 1988, 80: 61 - 79.
- [2] AAGAARD T, GREENWOOD B. Longshore and cross-shore suspended sediment transport at far infragravity frequencies in a barred environment[J]. *Continental Shelf Research*, 1995, 15(10): 1235 - 1249.
- [3] [美]柯马尔 P D. 海滩过程与沉积作用[M]. 邱建立等译. 北京: 海洋出版社, 1985.
- [4] LI L, BARRY D A, PATTIARATCHI C B, et al. Beach-Win: modeling groundwater effects on swash sediment transport and beach profile change [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2002, 17: 313 - 320.
- [5] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. *Proc R Soc Lond A*, 1998, 454: 903 - 995.
- [6] HUANG N E, SHEN Z, CONG S R, et al. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum [J]. *Annu Rev Fluid Mech*, 1999, 31: 417 - 457.
- [7] PAUL A, HUANG A, WAND D W, et al. A note on analyzing nonlinear and non-stationary ocean wave data [J]. *Applied Ocean Research*, 2003, 25: 187 - 193.
- [8] ZHAO J P, HUANG Da - ji. Mirror Extending and circular spline function for Empirical Mode Decomposition method [J]. *Journal of Zhejiang University (Science)* 2001, 2(3): 247 - 252.
- [9] 邓拥军, 王伟, 钱成春等. EMD 方法及 Hilbert 变换中边界处理问题 [J]. *科学通报*, 2001, 46(3): 257 - 263.
- [10] 黄大吉, 赵进平, 苏纪兰. 希尔伯特-黄变换的端点延拓 [J]. *海洋学报*, 2003, 25(1): 1 - 11.
- [11] 刘慧婷, 张旻, 程家兴. 基于多项式拟合算法的 EMD 端点问题的处理 [J]. *计算机工程与应用*, 2004(16): 84 - 86.

Analysis of Water Oscillations in Beach-surf Zone based on Hilbert-Huang Transform

WANG Yang-sheng, CHEN Zi-sen, LIU Meng-wei

(School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Hilbert-Huang Transform and its end issue and orthogonality were introduced to analyze the characteristic of waves in surf zone and groundwater level in beach through typhoon by HHT. The results show that wave-energy in surf zone augments and transfers to low frequency during typhoon, weakens and transfers to high frequency after typhoon. The oscillation of the groundwater level in beach is influenced by tidal and its period may be influenced by typhoon; coupling of chronometer high tide and typhoon result in singularity of groundwater oscillation.

Key words: Hilbert-Huang Transform; beach-surf zone; water oscillations