

基于改进 HHT 的海浪特征频率提取^①

肖 瑞^② 杨贤昭^③ 刘惠康

(武汉科技大学信息科学与工程学院 武汉 430081)

摘 要 海浪能源在地球上广泛分布,以共振发电获取该能源需要知道海浪的特征频率。本文主要利用 MEMS 传感器,微控制器 STM32 等设备对海浪特征参数进行提取,并结合改进的希尔伯特-黄变换(HHT)对收集到的数据进行时频分析,从而更加准确地找到海浪的主频率。针对传统 HHT 在 EEMD 分解过程中的端点效应及包络拟合不完全问题,本文利用镜像延拓法抑制端点效应,用三次埃尔米特(Hermite)插值替代三次样条插值消除包络线的过冲与欠冲,改进的 HHT 使时频分析的结果更为准确。实验分析的结果表明改进的 HHT 有效提高了特征频率的提取精度,为波浪发电最大效率获能奠定了基础。

关键词 海浪特征频率, MEMS 传感器, 希尔伯特-黄变换(HHT), EEMD 分解, 镜像延拓法, 三次埃尔米特(Hermite)插值

0 引 言

目前,传统化石燃料为人类生产活动提供了主要能源。然而这些能源在地球上的储量有限,属于不可再生能源且污染环境。

海浪能源作为广泛分布的清洁可再生能源,逐渐成为人们研究的重点方向^[1]。近年来,国内外根据俘获海浪能方式的不同,提出了多种海浪能利用方案,其中以主动共振海浪发电来获取海浪能的效率相对较高^[2]。该方法需测得海浪主频率,因此本文研究的是对海浪主频率参数的提取。传统的时频分析主要有短时傅里叶变换、连续小波变换和希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)等。其中以希尔伯特-黄变换的抗干扰能力和数据分析精度相对较好。然而传统的希尔伯特-黄变换也存在一些问题,如端点效应和包络线的过冲与欠冲情况。针对这些问题,本文提出在传统希尔伯特-黄变换的基础上进行改进,在 EEMD 分解过程中采用镜

像延拓法和三次埃尔米特(Hermite)插值法来分别解决这些问题。本文设计的基本原理是利用 MEMS 传感器以及微控制器 STM32 等设备提取海浪数据,同时结合改进的 HHT 对数据进行时频分析以准确找到海浪振动主频率。再通过调节机械设备的振动频率,使机械振动频率与海浪振动主频率保持一致,以达到共振的效果,从而获取最大能量转化效率。

1 系统设计

本系统主要分为硬件设计及软件算法两个部分。硬件部分通过 MEMS 传感器和 GPS 定位提取海浪特征参数并送至微控制器 STM32 分析处理,数据处理后由 SD 卡实时储存,同时通过无线接发模块传输给远方的 PC 机显示。该系统的硬件设计如图 1 所示。

软件部分先对采集数据进行姿态解算,再结合改进的 HHT 对其进行时频分析,最终可获得采集数据的振动频率并无线发送给远方设备。软件部分的

① 国家重点研发计划(2017YFC0805100)和教育部冶金自动化与检测技术工程研究中心开放课题(MADT201602)资助项目。
② 男,1991 年生,硕士生;研究方向:嵌入式及智能控制。
③ 通信作者 E-mail: yangxianzhao@wust.edu.cn
(收稿日期:2018-03-09)

过程如图 2 所示。

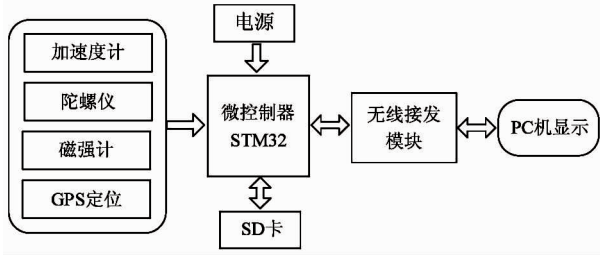


图 1 系统硬件框图

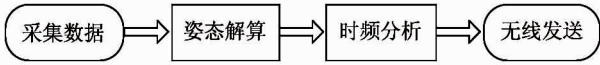


图 2 系统软件流程图

2 算法解析

在提取海浪波动参数的过程中,会涉及到相应的算法。本文主要用到的是 MEMS 传感器的算法以及改进的 HHT 算法,下面将重点解析这些算法。

2.1 MEMS 传感器的算法

MEMS 传感器部分主要由加速度计、陀螺仪和磁强计三部分组成。这里主要介绍的算法为姿态解算^[3,4]。本实验所需的海浪参数是垂直水平面方向上的加速度,但由于环境的干扰,导致载体坐标系(b 系)与地理坐标系(i 系)之间出现偏角,致使 b 系中加速度计所测得的 Z_b 轴方向的加速度 a_z 并非实验分析所需的 i 系中 Z_i 轴方向的加速度 a'_z ,因此需要一个旋转矩阵 T_b^i 实现从 b 系到 i 系的变换,从而对 b 系中加速度计所测得三轴加速度分量进行解算,最终转化求得 Z_i 轴方向上的加速度 a'_z 。坐标系之间的变换如图 3 所示。

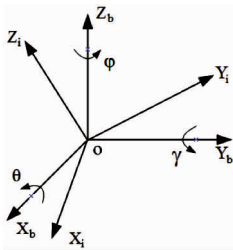


图 3 坐标变换图

此外,在变换图 3 中的 θ, γ, φ 分别为 b 坐标系

绕 X_b 轴, Y_b 轴, Z_b 轴旋转得到 i 坐标系的姿态角,且依次为横摇角度,纵摇角度及艏摇角度。

旋转矩阵 T_b^i 则是以四元数 $Q(q_0, q_1, q_2, q_3)$ 的形式来表示。该四元数可视为一个超复数,一般表达式为 $Q = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k$ ^[5]。其中, i, j, k 为虚数单位,可以理解为刚体绕空间坐标轴 X, Y, Z 的一种旋转过程。当向量 A_b 绕着等效转轴的单位方向向量 n 旋转 θ 角度到达向量 A_i 时,就可以构造一个四元数。而式(1)即为新构造的四元数表达式。

$$Q = \cos \frac{\theta}{2} + n \cdot \sin \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

一个向量 A_b 按照四元数的运算规则旋转至向量 A_i 的算法如式(2), Q^* 为四元数 Q 的共轭, $\otimes$ 为四元数乘法符号。

$$A_i = Q \otimes A_b \otimes Q^* = T_b^i \cdot A_b \quad (2)$$

其中,旋转矩阵 T_b^i 以四元数 Q 的表达式如下所示:

$$T_b^i = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_0q_2 + q_1q_3) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_0q_1 + q_2q_3) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过陀螺仪测得的三轴的角速度 (w_x, w_y, w_z), 可以列有关于四元数的微分方程,再结合一阶龙格-库塔法从而解出四元数 Q 的元素值,即可求出旋转矩阵 T_b^i 。该微分方程如式(4):

$$\dot{Q}(t) = \frac{1}{2}Q(t) \otimes w \quad (4)$$

该 $w = (0, w_x, w_y, w_z)$ 为结合三轴角速度值所得。

若令 $(A_i = a'_x, a'_y, a'_z)$ 为 i 系三轴加速度向量, $A_b = (a_x, a_y, a_z)$ 为 b 系三轴加速度向量,分别代入式(2)则可得:

$$\begin{bmatrix} a'_x \\ a'_y \\ a'_z \end{bmatrix} = T_b^i \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

从而可以求得实验所需的地理坐标系中 Z_i 轴方向的加速度 a'_z 。此外,结合式(3)还可求出 b 系旋转至 i 系的坐标系变换姿态角 γ, θ, φ 。如式(6)所示:

$$\begin{cases} \gamma = \arctan\left(\frac{-T_{31}}{T_{33}}\right) \\ \theta = \arcsin(T_{32}) \\ \varphi = \arctan\left(\frac{-T_{12}}{T_{22}}\right) \end{cases} \quad (6)$$

2.2 改进的 HHT 算法

针对上述姿态解算所得 Z_i 轴方向的加速度 a_z ，还需进一步对该数据进行时频分析，以此找到主频率。用到的方法是改进的 HHT^[6-8]。下面主要介绍 HHT 算法的基本内容以及在对信号进行 EEMD 分解过程中采用的镜像延拓法^[9,10]和三次 Hermite 插值法^[11,12]。

2.2.1 算法的基本内容

HHT 算法的基本内容分为两个部分：其一，先对输入信号进行 EEMD 分解，得到一些本征模态函数 IMF；其二，对分解得到的 IMF 分量进行 Hilbert 变换，从而得到时频平面的 Hilbert 谱，最终运算得到边际谱。在对信号进行模态分解时，用 EEMD 算法可以抑制分解过程中模态混叠的现象，其一般步骤如下。

(1) 给待分析的原信号 $x(t)$ 加入给定幅度的白噪声，并且对加了噪声之后的信号进行归一化处理。

(2) 对加噪声之后的信号进行 EMD 分解，得到 K 个 IMF 分量 $c_j(t)$ 以及残余量 $r(t)$ ，($j = 1, \dots, K$)。

(3) 重复步骤(1)和步骤(2) Q 次，每次加的噪声为随机白噪声序列，即

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^K c_{ij}(t) + r_i(t) \quad (7)$$

该式中， $x_i(t)$ 为第 i 次加入白噪声之后的信号； $c_{ij}(t)$ 为第 i 次加入白噪声后分解所得的第 j 个 IMF 分量， $j = 1, \dots, K$ 。

(4) 利用不相关序列的统计平均值为零的基本原理，对每次分解所得对应的 IMF 分量进行集合平均运算，以消除多次加入白噪声对实际 IMF 的影响，最终得到 EEMD 分解之后的 IMF 分量以及残余量 $r(t)$ ，且依次为

$$c_j(t) = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q c_{ij}(t) \quad (8)$$

$$r(t) = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q r_i(t) \quad (9)$$

该式中， $c_j(t)$ 为对原信号进行 EEMD 分解之后得到的第 j 个 IMF 分量。

(5) 经由以上步骤之后，原始信号可表示为

$$x(t) = \sum_{j=1}^K c_j(t) + r(t) \quad (10)$$

而对于任意的时间序列 $x(t)$ ，总是有它的 Hilbert 变换 $y(t)$ ：

$$y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (11)$$

根据这一定义， $x(t)$ 与 $y(t)$ 组成了一个共轭复数对，于是可以得到解析信号 $z(t)$ ：

$$z(t) = x(t) + iy(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (12)$$

其中，幅值和角度如下：

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}, \theta(t) = \arctan\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right) \quad (13)$$

通过 Hilbert 变换，瞬时频率定义为

$$w = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (14)$$

综上所述，对这些 IMF 分量进行 Hilbert 变换，最终可得信号 $x(t)$ 的 Hilbert 时频谱，记作：

$$H(w, t) = \text{Re} \sum_{j=1}^K a_j(t) e^{i \int w_j(t) dt} \quad (15)$$

这里省略了残余量，而 Re 表示取实部。该式体现了瞬时振幅在时频平面上的分布。

同时，根据 Hilbert 时频谱还可以进一步定义边际谱 $h(w)$ ，如式(16)：

$$h(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(w, t) dt \quad (16)$$

其中， $h(w)$ 表示各频率上的能量分布，代表着各频率上的能量在整个时间长度内的累加。

2.2.2 镜像延拓法

在 EEMD 分解过程中，信号的端点效应会带来相应的误差，并且该误差还会向内传播，进而可能污染整个待分析的数据序列，使得最终的结果失去实际意义，尤其是对低频的 IMF 分量而言，这种端点效应所造成的影响会更加严重。因此，为了处理端点效应，本文采用镜像延拓法。该方法是利用镜像的对称映射特点，在信号的左右两侧且具有对称性

的极值点上分别放置一面镜子,例如在信号从左至右的第 l 个极值点处,以及在信号从右至左的第 r 个极值点处各放一个平面镜,将镜子内的信号向外进行对称映射,这样就得到信号长度两倍于境内长度的周期信号。实际上,只需选取其中的一个周期,并将其首尾相连,就可形成一个环形的闭合曲线。经过镜像延拓之后的信号不含端点且具有周期性。镜像延拓法的优势在于闭合信号的无端点性,因此该方法从本质上解决了 EEMD 分解过程中的端点问题,其基本过程如下所示。

(1) 将左边的镜子放在信号从左至右的第 l 个极值点处,其相应的序列号为

$$I_1 = \begin{cases} I_m(l) & \text{当镜子位于极大值处} \\ I_n(l) & \text{当镜子位于极小值处} \end{cases} \quad (17)$$

(2) 将右边的镜子放在信号从右至左的第 r 个极值点处,其相应的序列号为

$$I_2 = \begin{cases} I_m(M+1-r) & \text{当镜子位于极大值处} \\ I_n(N+1-r) & \text{当镜子位于极小值处} \end{cases} \quad (18)$$

(3) 产生的新信号序列 (t', x') , 如下

$$t'(i) = \begin{cases} t_{I_1} + (i-1)\Delta t & i = 1, \dots, J \\ t_{I_2} + (i-J)\Delta t & i = J+1, \dots, 2J \end{cases} \quad (19)$$

$$x'_i = \begin{cases} x_{I_1+i-1} & i = 1, \dots, J \\ x_{I_2+J-i} & i = J+1, \dots, 2J \end{cases} \quad (20)$$

(4) 新的信号序列长度为

$$J = I_2 - I_1 + 1 \quad (21)$$

(5) 对于新信号序列 (t', x') , 需要重新检索出极值点,同时得到与极值点相应的序列下标 (I'_m, I'_n) , 时间 (T'_m, T'_n) 以及对应的函数值 (U', V')

$$T'_m(i) = t'(I'_m(i)), U'(i) = x'_{I'_m(i)} \\ i = 1, \dots, M' \quad (22)$$

$$T'_n(i) = t'(I'_n(i)), V'(i) = x'_{I'_n(i)} \\ i = 1, \dots, N' \quad (23)$$

之后可利用曲线插值拟合求得信号的上下包络线。

为了进一步说明镜像延拓法在处理端点效应方面的有效性,因此结合一个实例,如下:

$$x = e^{i20t} + e^{i45t} \quad (24)$$

该信号的曲线如图 4 所示。

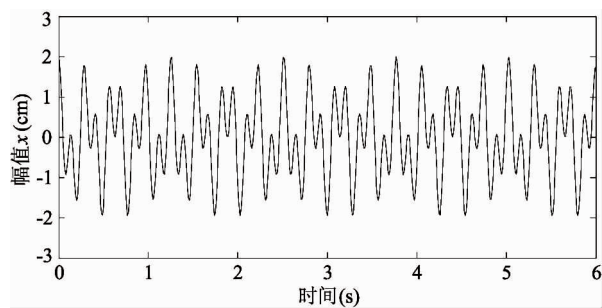
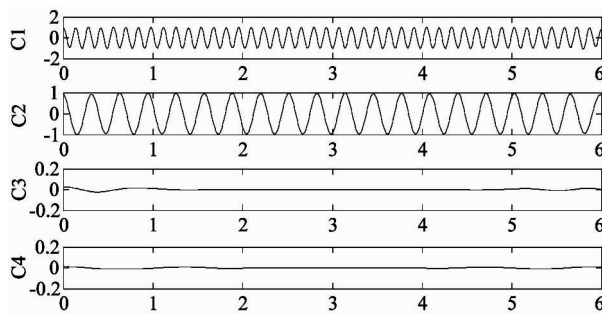
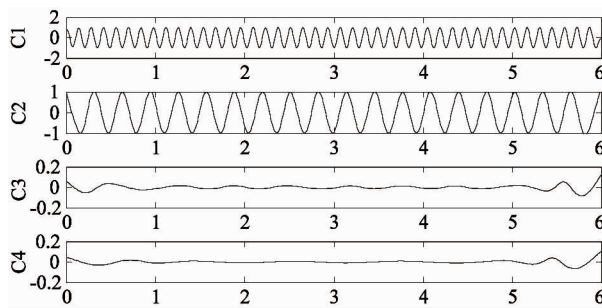


图 4 信号曲线图

分别对该信号采用镜像延拓法和不采用延拓法两种方式对其进行 EEMD 分解(噪声的标准差设置得非常小),最终得到的效果如图 5 所示。



(a) 采用镜像延拓法的 EEMD 分解效果图



(b) 未采用延拓法的 EEMD 分解效果图

图 5 信号分解对比图

在图 5 的信号分解对比图中,图 5(a)代表采用镜像延拓法的 EEMD 分解效果图,图 5(b)代表未采用延拓法的 EEMD 分解效果图。从这两幅图中,可以看出图 5(a)中的分解效果相对较好,而图 5(b)中分解到 C3 和 C4 的时候出现了污染的情况。由

此可以说明在对信号进行 EEMD 的分解过程中,采用镜像延拓法可以有效抑制端点效应。

2.2.3 三次 Hermite 插值法

此外,在 EEMD 分解过程中,需要对信号 $x(t)$ 进行包络线的绘制,而传统的 HHT 算法是用三次样条插值法对信号曲线进行上下包络拟合,该方法收敛性较好且光滑度较高,但在曲线拟合过程中会出现过冲与欠冲的情况,尤其是对比较强的非平稳信号,则会更加明显。而本文中所用的三次 Hermite 插值法不仅具有三次样条插值法收敛性好和光滑度高的特点,而且相较于三次样条插值法来说,效率也更高。其次,在用三次 Hermite 插值法构造拟合曲线时,只要求在节点位置一阶导数连续,因此在确保拟合曲线的连续性和光滑度较好的同时,还具有优良的拟合曲线保形性,避免了对信号曲线进行拟合过程中出现的过冲与欠冲的现象,而且在面对较强的非平稳信号时也具有较好的适应性。该三次 Hermite 插值法的基本定义如下。

在某区间 $[a,b]$ 上,已知该处相应的插值节点为 $a \leq x_0 \leq x_1 \cdots \leq x_n \leq b$ 的函数值及其一阶导数值分别为

$$y_i = f(x_i), m_i = f'(x_i) \quad (i = 0,1,\cdots,n)$$

(25)

此外,要求是一个次数不超过 3 的多项式 $H(x)$, 使其满足以下条件:

$$H(x_i) = y_i, H'(x_i) = m_i \quad (i = 0,1,\cdots,n)$$

(26)

称 $H(x)$ 为三次 Hermite 插值多项式,而上述条件即为插值条件。

本实验在对加速度 a_z 信号进行包络线绘制时,利用三次 Hermite 插值法替代传统的三次样条插值法,以获得更好的信号包络曲线,使时频分析的结果更为准确。同样为了更好说明三次 Hermite 插值法的优越性,这里用一个实例结合上述两种方法进行对比分析,该输入信号为:

$$y = \sin(0.2\pi t) + \sin(0.35\pi t) + \cos(0.6\pi t)$$

(27)

其中,实线为输入信号,虚线表示三次 Hermite 插值法,点线为三次样条插值法。运行后的效果如图 6

所示。

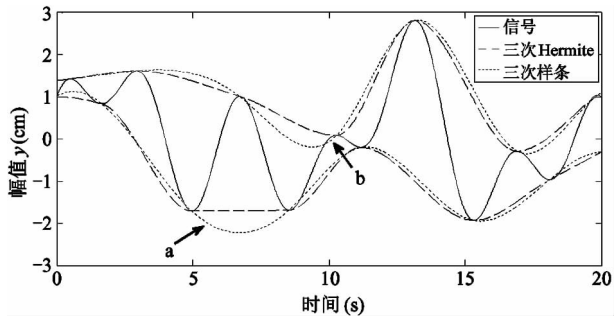
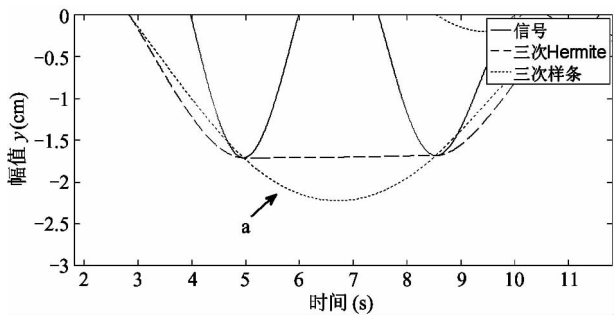
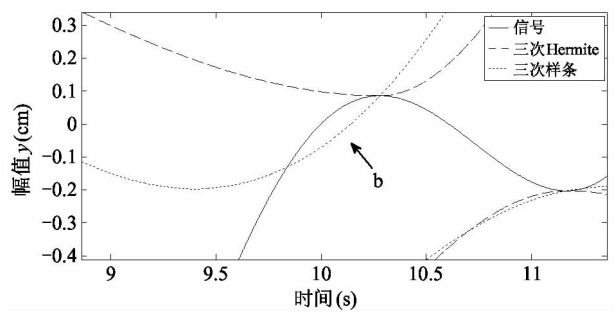


图 6 包络线对比图

在图 6 中,箭头所指位置可以体现上述两种方法对该信号包络的差别,放大后的效果如图 7 所示。



(a) 下包络线对比图



(b) 上包络线对比图

图 7 包络线放大图

在图 7 中,由图(a)与图(b)可以明显看出用三次样条插值法所绘制的信号包络线分别出现了过冲与欠冲的情况,而用三次 Hermite 插值法的信号包络线能够较好地对输入信号进行曲线拟合。其中,传统的三次样条插值法在 a 与 b 处进行包络线绘制时出现了过冲与欠冲的情况,该误差产生的原因是三次样条插值在某些待拟合的 2 个邻近插值点之间

不具备单调性。此外,与传统的三次样条插值法相比,三次 Hermite 插值法采用了三次多项式逼近,因此它具有较好的光滑性,并且保证了 2 个邻近插值点间的拟合曲线是单调的,可以避免过冲与欠冲的情况。同时利用三次 Hermite 插值法所绘制的包络线可以较好地包住信号,因此该方法具有优良的拟合曲线保形性。

通过上述对比可以体现在对输入信号进行曲线包络时,采用三次 Hermite 插值法要比三次样条插值法的效果更好,能够获得更为准确的曲线包络数据。

3 实验分析

3.1 输入加速度 a_z^i 信号

在完成系统设计后,选择在武汉市东湖水面对本系统进行实验分析。虽然相比于海平面,东湖水面没有受到太多气压变化,风速及地形环境等因素的影响,但是这两者具有波浪的共性特点,都是由于风力产生的水面波动,而且其波浪都是由各种频率的波叠加而成。因此,可以利用对东湖水面波浪的实测来验证该系统设计的可行性。具体地,结合硬件设备及软件算法,可得 i 系中 Z_i 轴方向的加速度 a_z^i ,如图 8 所示。在东湖实时采集波浪数据时,微控制器的采样频率为 250Hz,再从这每秒的 250 个采样点中随机选取 32 个点作为改进的 HHT 变换的处理数据,实地测得 5 组数据,且每组数据平均时长 5 分 50 秒,故预计有 11200 个采样点。

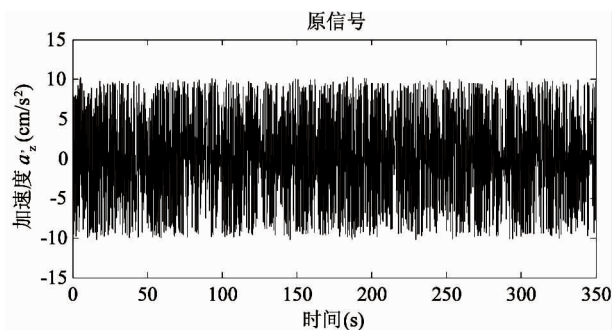


图 8 输入 a_z^i 信号

3.2 改进的 HHT 分析

由算法解析得到加速度输入信号 a_z^i ,再利用改进的 HHT 对该信号进行时频分析以找到波浪振动的主频率参数。在进行 EEMD 分解过程中,得到部分 IMF 分量如图 9 所示。其中, C11 之后为残余量,可忽略不计。

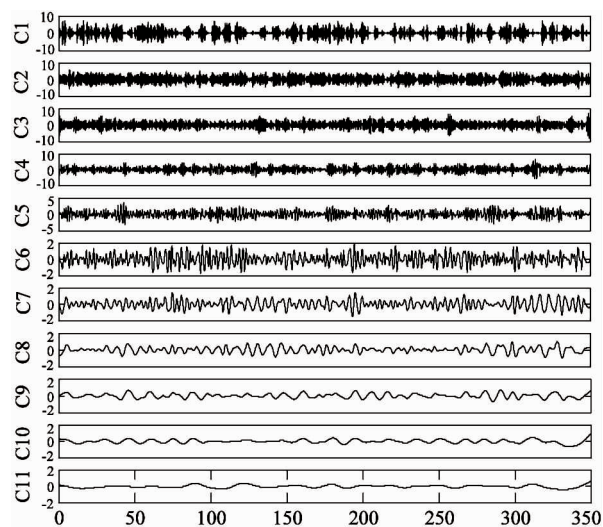


图 9 IMF 分量图

同时利用改进的 HHT 对输入信号 a_z^i 进一步运算,得到该信号的能量分布-边际谱,如图 10 所示。

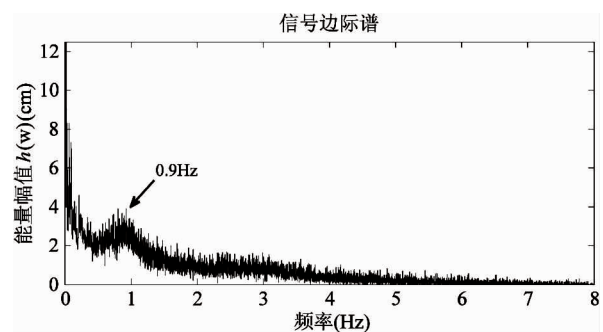


图 10 边际谱图

此外为了更好地证明此改进算法在数据提取精度上的优越性,针对同样加速度输入信号 a_z^i ,利用传统的 HHT 对其进行时频分析,最终得到能量分布-边际谱,如图 11 所示。

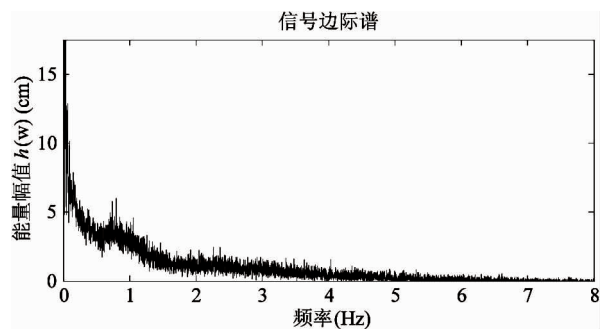


图 11 边际谱图

由图 11 较难准确知道该水域波浪的显著主频率,而根据图 10 可知该东湖水域波浪的能量分布主要集中在低频段,而其中的显著主频率大约在 0.9Hz 左右,比较接近于实际的观察值。关于实时性方面,在同等波浪频率及采样数据的条件下,改进 HHT 算法的程序运行时间要比传统 HHT 算法的程序运行时间慢 5s ~ 6s 左右,但是仍然满足波浪主动共振发电系统的实时性要求。由此证明了改进 HHT 算法在精确度方面优于传统算法,同时也验证了本文所设计系统的有效性。

4 结 论

本文主要从海浪特征频率参数的提取精度出发,采用 MEMS 传感器,微控制器 STM32 及无线模块等硬件设备来构建波浪参数的提取平台,以及在 这些控制设备中融入改进的 HHT 算法,从而建立起一个能够实时和准确捕获海浪特征频率的系统。对于原始的采样数据,该系统利用四元数进行姿态解算以获取浮标的运动状态,即时频分析所需的加速度信号 a_z 。针对传统的 HHT 算法在分析信号时的缺陷,该系统则在传统算法的基础上进行改进,在对解算后的信号 EEMD 分解过程中结合镜像延拓法抑制端点效应,以及在包络线的拟合过程中用三次 Hermite 插值法替代了传统的三次样条插值法,避免了包络线绘制时的过冲与欠冲现象,从而获得更好的信号包络曲线,最终使时频分析的结果更为准确。

实验表明,该系统在对波浪特征频率参数进行提取时,其数据精度有明显提高,效果较为理想,从而为共振发电系统能够更加高效的获能奠定了基础。但是不同的海域环境对该系统会提出不同的要求,所以下一步研究的重点是使该系统在适应不同水域的同时也能保证频率提取精度和产能效率。

参考文献

- [1] Izadparast A H, Niedzwecki J M. Estimating the potential of ocean wave power resources[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(1): 177-185
- [2] 蔡元奇. 共振波力发电装置[P]. 中国专利, CN201110233308.7. 2011-08-16
- [3] 周金金,王小英. 基于 MEMS 的海洋浮标云台稳定控制算法[J]. *制造业自动化*, 2015, 37(2): 76-79
- [4] 吴远方,陈光柱,周江伟,等. 基于 MEMS 传感器的无线振动测量节点设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2017, (1): 110-114
- [5] 秦永元. 惯性导航. 北京: 科学出版社, 2014. 01-01
- [6] Zhou Y H, Chen W C, Gao J H, et al. Application of Hilbert-Huang transform based instantaneous frequency to seismic reflection data[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2012, 82(7): 68-74
- [7] 宋宇,游海龙,翁新武,等. 基于希尔伯特-黄变换的信号处理方法[J]. *长春工业大学学报*, 2015, 36(4): 374-378
- [8] 雷亚国. 基于改进 Hilbert-Huang 变换的机械故障诊断[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(5): 71-77
- [9] 余磊,刘泉. 经验模态分解中端点效应的抑制[J]. *武汉理工大学学报*, 2010, 32(10): 151-154
- [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] 马宏陆,葛琳琳,牛强,等. 一种基于改进 EMD 的风机振动信号异常检测方法[J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 2017, 40(1): 55-72
- [12] 时培明,王敬,温江涛,等. 基于包络线算法改进 EMD 的旋转机械故障诊断方法研究[J]. *计量学报*, 2016, 37(1): 62-66

Extraction of wave characteristic frequency based on improved HHT

Xiao Rui, Yang Xianzhao, Liu Huikang

(Institute of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract

Wave energy, which is widely distributed on Earth, can be obtained by resonance generation with the knowledge of the characteristic frequency of waves. In this paper, the characteristic parameters of ocean waves are extracted by using MEMS sensors, microcontroller STM32 and other equipment, and the time-frequency analysis of the collected data is carried out with improved Hilbert-Huang transform (HHT), so as to find out the main frequency of ocean waves more accurately. With regard to the problem of endpoint effect and incomplete envelope fitting of traditional HHT in EEMD decomposition process, the paper employs method of the mirror extension to suppress the endpoint effect, and uses cubic Hermite interpolation instead of cubic spline interpolation to eliminate the envelope overshoot and undershoot. The improved HHT makes the results of time-frequency analysis more accurate. The experimental results show that the improved HHT effectively improves the extraction accuracy of the characteristic frequency and lays a foundation for the maximum efficiency of wave power generation.

Key words: wave characteristic frequency, micro-electro-mechanical system(MEMS) sensor, Hilbert-Huang transform(HHT), ensemble empirical mode decomposition(EEMD), mirror extension method, cubic Hermite interpolation