

应用希尔伯特黄变换的单矢量传感器 多目标分辨研究

王逸林, 蔡 平, 许丹丹

(哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 将希尔伯特黄变换与矢量信号处理相结合应用到水声领域, 与传统方法相比有许多优势。在希尔伯特黄变换中本征模态函数是基于序列数据的局部时间尺度特征而得出。每个本征模态函数可以看作是信号中一个固有振荡模态, 其对应于某个目标的固有振荡, 希尔伯特黄变换用经验模态分解的方法将信号分解为多个本征模态函数, 可以较好地将不同目标的能量分离。该变换得到的瞬时频率、瞬时能量和瞬时方位具有清晰的物理意义, 信号的时间-频率-方位-能量的四维分布为多目标信号处理提供了丰富的信息量。与传统处理方法相比不仅有较好的目标分辨效果, 而且适用于非线性和非平稳信号的处理。

关键词: 经验模态分解; 本征模态函数; 希尔伯特黄变换; 矢量希尔伯特黄变换

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2006)-04-0376-05

Separation of multiple targets using a single vector sensor based on Hilbert-Huang transform

WANG Yi-lin, CAI Ping, XU Dan-dan

(School of Underwater Acoustics Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: An application of Hilbert-Huang transform combining with the vector signal processing in underwater acoustics is introduced. The technique has many advantages in comparison with traditional methods. In Hilbert-Huang transform, the intrinsic mode function is derived from the data by their characteristic time scales. Each IMF is an intrinsic oscillatory mode, and it can be identified as the intrinsic oscillatory of one target. Hilbert-Huang transform decomposes the data into IMFs to better separate the energy of different targets. The instantaneous frequency, instantaneous energy and instantaneous azimuth obtained by HHT can be defined everywhere. The amplitude-frequency-azimuth-time distribution of the signal can provide rich information of targets. In comparison with traditional methods, the new method not only gives better result, but also fit for nonlinear and non-stationary signal processing.

Key words: empirical mode decomposition (EMD); intrinsic mode functions (IMF); Hilbert-Huang transform (HHT); vector HHT

1 引 言

矢量传感器能够同时同点拾取声场的声压和振

速信息, 传统的矢量信号处理方法是利用平均声强器进行方位估计^[1]。在多目标情况下, 即多个目标具有频带重叠的连续谱特征时, 平均声强器输出的方位并不是目标的真实方位, 而是多个目标声强流的合成方位。因此在这种情况下不具备区分多目标的能力^[2]。

为了解决这个问题, 已有许多研究。如利用 DEMON 谱^[3], 高阶统计量^[4]等方法。本文叙述了希

收稿日期: 2005-11-29; 修回日期: 2006-03-01

作者简介: 王逸林(1975-), 男, 河北静海人, 博士研究生, 研究方向: 通信与信息系统, 水声信号处理。

尔伯特黄变换原理,并将其与矢量信号处理相结合(简称矢量 HHT),在此基础上定义了瞬时方位的概念,并利用其进行单矢量传感器多目标分辨的研究。

2 希尔伯特黄变换

HHT^[5]的基础是经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)。

对信号做 EMD 分解可以获得一系列表征信号时间尺度特征的 IMF。分解得到的各阶 IMF 必须满足以下两个条件:

1.对于整个信号,跨零点与极值点的个数相等或至多相差一个;

2.在数据的任意点,由极大值定义的上包络和极小值定义的下包络的均值为零;

将所有的 IMF 和余量累加起来,将得到:

$$X(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (1)$$

可见信号被分解成 n 个 IMF 和一个信号余量。

从全局上 IMF 可以是平稳信号,也可以是非平稳信号。由于 IMF 强调的是局部时间尺度的概念,希尔伯特变换依然有意义^[5]。

对 IMF 作 Hilbert 变换,设 IMF 信号为 $c(t)$,则它的复解析信号为:

$$H[c(t)] = c(t) + j\tilde{c}(t) = a(t)e^{j\phi(t)} \quad (2)$$

幅值函数

$$a(t) = \sqrt{c^2(t) + \tilde{c}^2(t)} \quad (3)$$

相位函数

$$\phi(t) = \tan^{-1}(\tilde{c}(t)/c(t)) \quad (4)$$

其中幅值函数表示信号每个采样点的瞬时幅度(能量);相位函数表示信号每个采样点的瞬时相位,对其求导就是瞬时频率。

$$\omega(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (5)$$

3 瞬时方位的定义

结合 HHT 和矢量信号处理,利用 IMF 信号的局部时间尺度特性我们提出了瞬时方位的概念。

对声压 $p(t)$ 和振速 $v_x(t)$ 和 $v_y(t)$,各自进行 EMD 分解分别得到各自的 IMF,分别表示为: $p_j(t)$, $v_{xj}(t)$, $v_{yj}(t)$,其中 j 表示经过 EMD 分解后得到的

IMF 的顺序编号称之为阶数。

将各阶 IMF 进行 Hilbert 变换后得到其复解析信号,

$$H(p(t)) = p(t) + j\tilde{p}(t) = A(p(t))e^{j\omega(p(t))} \quad (6)$$

$$H(v_{xj}(t)) = v_{xj}(t) + j\tilde{v}_{xj}(t) = A(v_{xj}(t))e^{j\omega(v_{xj}(t))} \quad (7)$$

$$H(v_{yj}(t)) = v_{yj}(t) + j\tilde{v}_{yj}(t) = A(v_{yj}(t))e^{j\omega(v_{yj}(t))} \quad (8)$$

将式(6)、(7)、(8)中 $p(t)$, $v_x(t)$, $v_y(t)$ 的对应相同尺度的 IMF 共轭相乘,得到:

$$S(pv_{xj}, t) = H(p(t)) \times H^*(v_{xj}(t)) \quad (9)$$

$$S(pv_{yj}, t) = H(p(t)) \times H^*(v_{yj}(t)) \quad (10)$$

其中 $S(pv_{xj}, t)$ 和 $S(pv_{yj}, t)$ 为矢量传感器 X 轴和 Y 轴的“瞬时声能流”。

“瞬时声能流”保留了声信号的瞬时能量信息。通过 X 轴和 Y 轴的瞬时声能流可以得到这一时刻声信号的瞬时方位:

$$\theta_j(t) = \tan^{-1} \left(\frac{R[S(pv_{yj}, t)]}{R[S(pv_{xj}, t)]} \right) \quad (11)$$

4 仿真分析

通过矢量 HHT 的方法可以得到三个瞬时量:瞬时频率,瞬时能量和瞬时方位,进而得到了信号的能量-频率-方位-时间四维信息,可以利用这些信息不同组合来分析目标特性。

图 1 为仿真结果,仿真条件为空间有两个目标分别在 35 和 55°,都是 500Hz~2000Hz 的色噪声信号,信噪比 25dB。信号长度为 0.1s。

由于 EMD 分解后的信号同一目标的信号可能会分布在不同阶 IMF 中。各阶 IMF 之间并不是严格的按照频段分离,相邻各阶 IMF 之间有相互覆盖的频率带,但大致当阶数增高时,相应的频率从高到低。

经过 EMD 分解后分别求出各个 IMF 的瞬时频率、瞬时能量和瞬时方位。

对瞬时频率和瞬时能量做统计得到信号的能量-频率-时间三维分布信息。这种表示方法即为 Hilbert 谱,它反映了信号频率随时间的变化与分布。对 Hilbert 谱进行时间上的积分,得到的频率-能量分布称为边缘谱(或边际谱)。

同理,对瞬时方位和瞬时能量做统计得到信号的能量-频率-时间三维分布信息,称之为 Hilbert 空间谱。它反映了信号方位随时间的变化与分布。对

Hilbert空间谱进行时间上的积分,得到的方位-能量分布称为边缘空间谱。

图 1 是 IMF1 频率边缘谱(a)和方位边缘谱(b)和 IMF2 频率边缘谱(c)和方位边缘谱(d)。两个信号都是宽带信号,但能量的中心一个在 1.6kHz,另一阶在 1kHz 左右。可以看到特性不同的目标被分

在不同的 IMF 中,对各阶 IMF 分别求瞬时频率与方向,避免了传统矢量信号处理中多目标声能流合成的问题^[2],可以分辨出特性不同的目标。而我们用平均声强器^[1]得到在 45°的合成方位(见图 2)。

传感器接收到的是多个信源信号的叠加,每个信源的信号有不同的方位和频率,因此同一时刻信

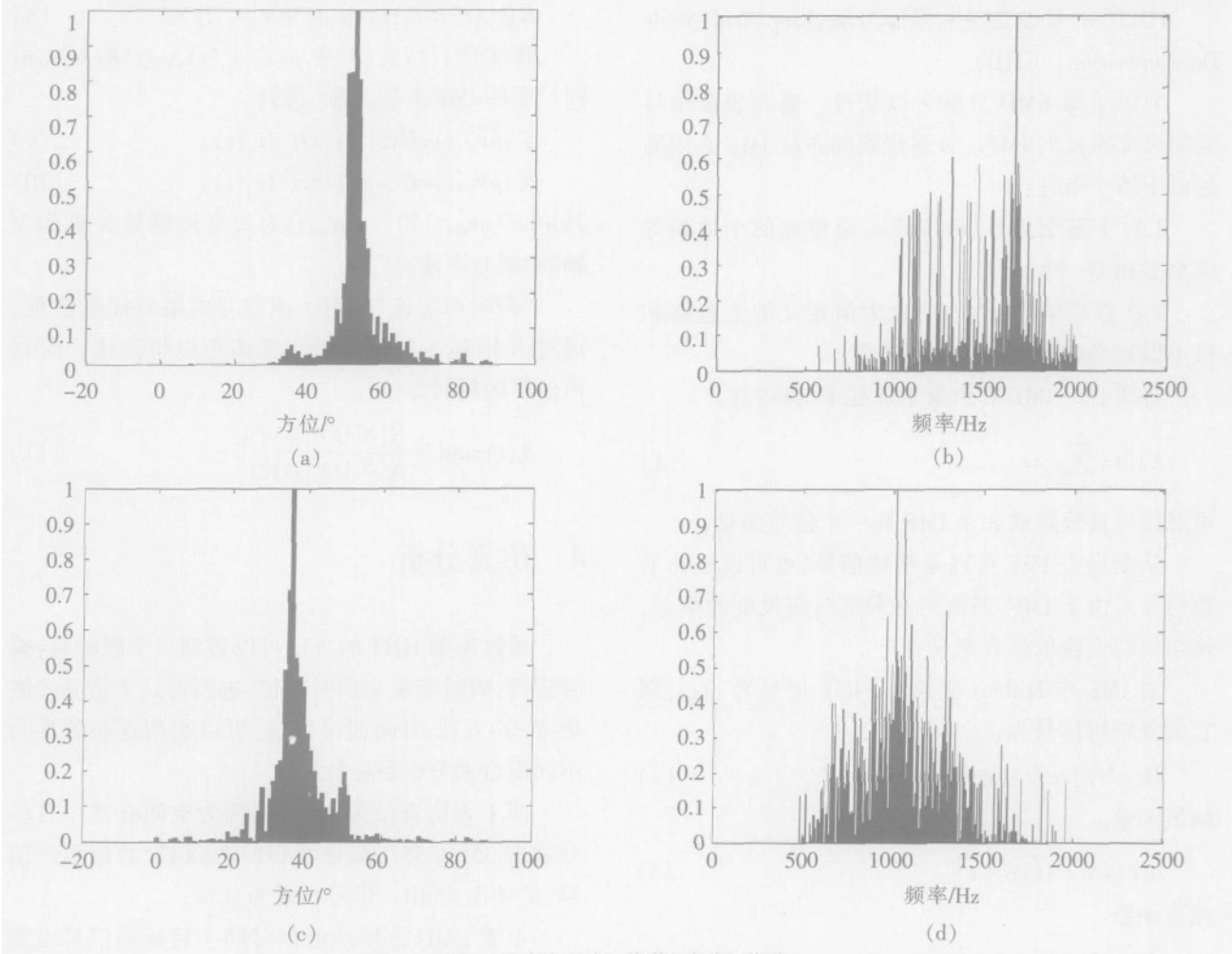


图 1 双目标的频率边缘谱和方位边缘谱

Fig.1 The frequency marginal spectrum and azimuth marginal spectrum of two targets

号是多个频率和方位的合成。多个 IMF 在同一时刻信号有着不同的瞬时频率和瞬时方位,这一结果更符合实际情况。

5 湖试结果

取一个时间窗,对窗内的数据分析各阶 IMF 的方位边缘谱。滑动时间窗就得到不同时刻的方位分布图。据此可以画出目标的方位瀑布图。

接收阵为一个二元矢量阵,正横位置(Y轴)为 0°。大坝在-90°方向,是一个宽带强干扰。

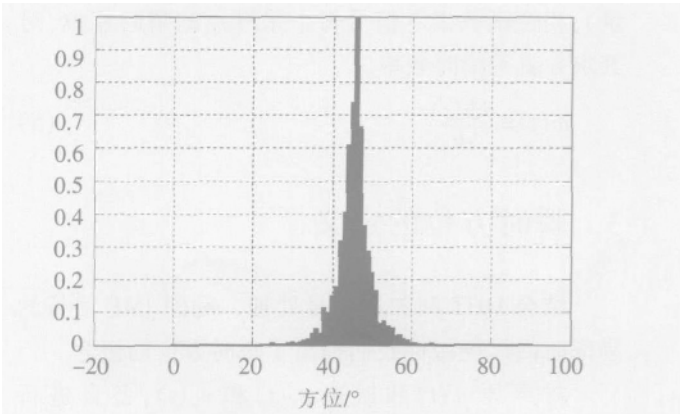
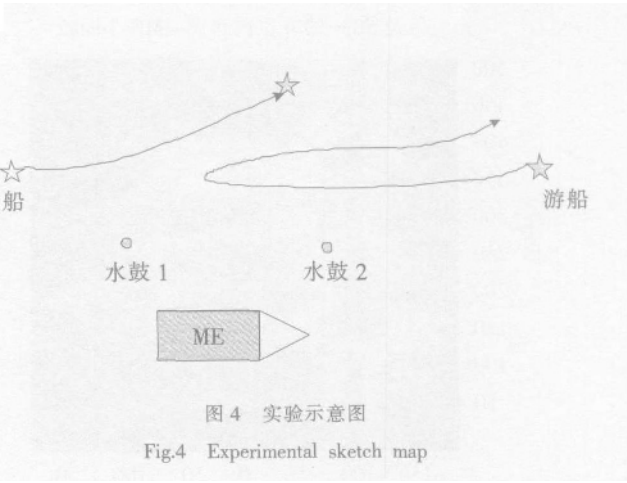
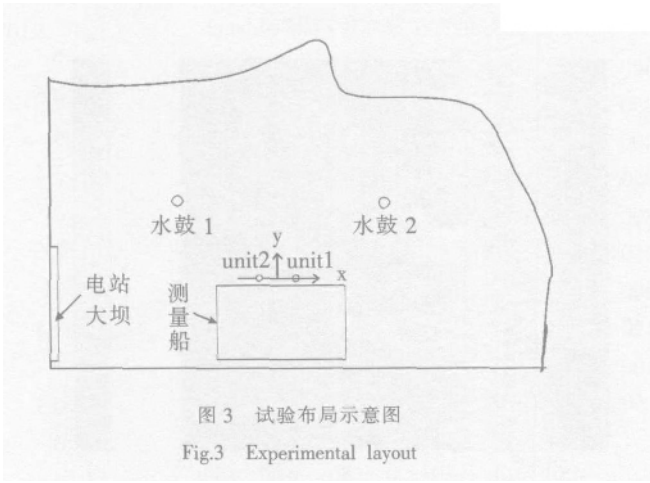


图 2 双目标平均声强器方位直方图

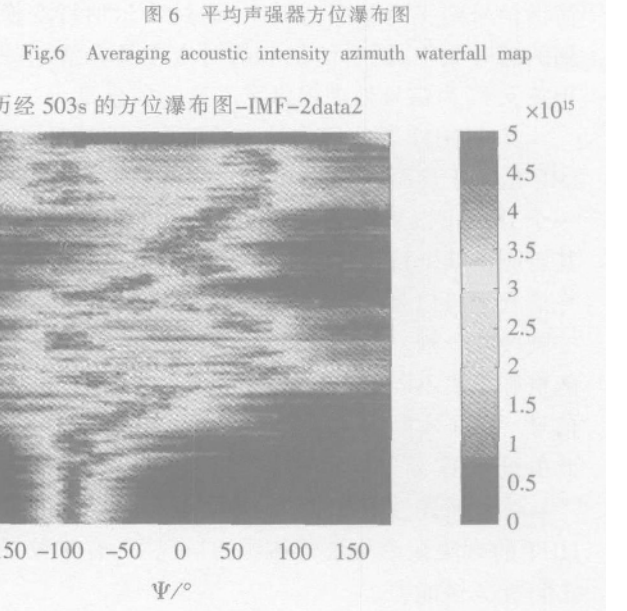
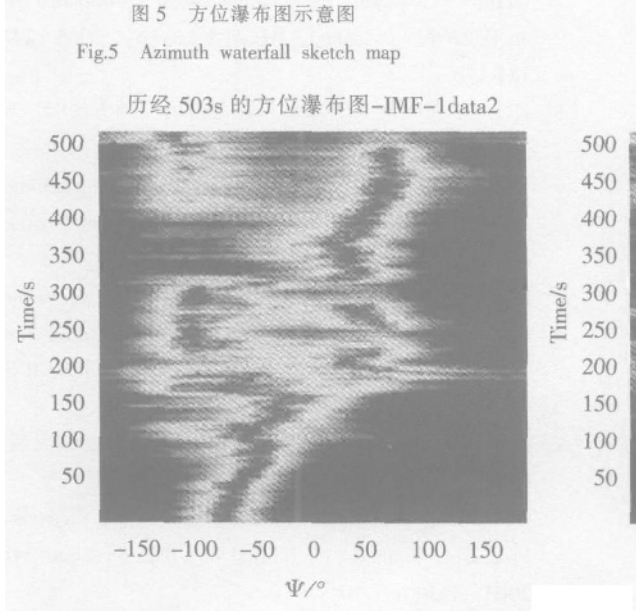
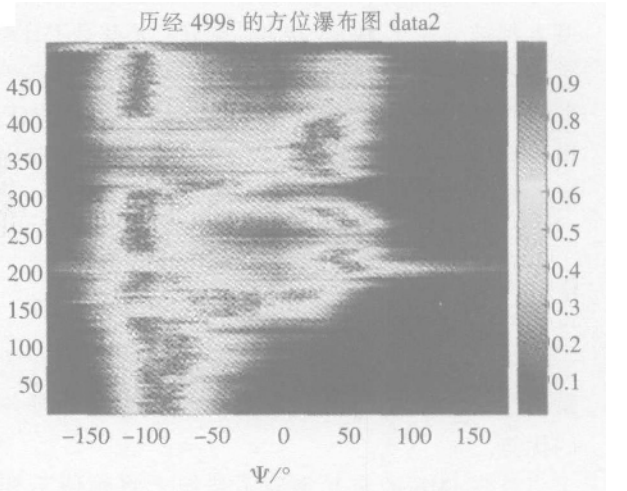
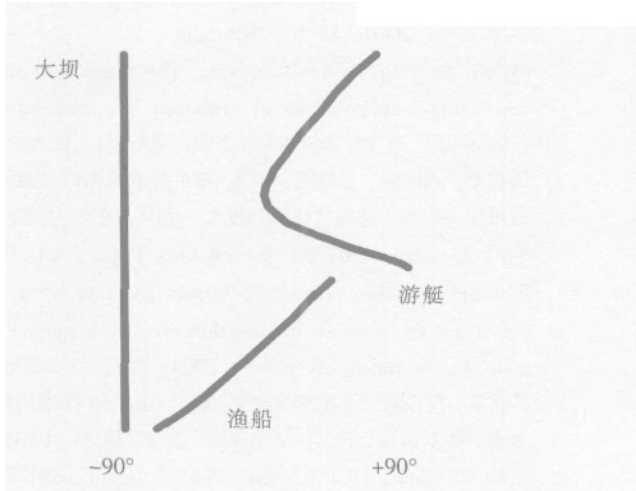
Fig.2 Azimuth histogram of two targets based on averaging acoustic intensity



实验过程为渔船从左侧驶到中间停下来捕鱼, 大约 200s 时一艘游船从右侧驶入, 转一圈后从右侧驶出。图 5 为实验方位瀑布图的示意图。

图 6 是用平均声强器的处理结果。由于大坝是宽带的强信号, 用传统的矢量信号处理的方法, 在各

个频段都有很强的干扰。当大坝和船的方位在同一象限时, 两个目标合成在一起。可以看出渔船的轨迹与大坝合成在一起而分不出大坝和船。当船和大坝的方位在不同象限时, 轨迹显示较强的信号, 弱信号被压制, 大坝和游艇的轨迹都是断断续续的。



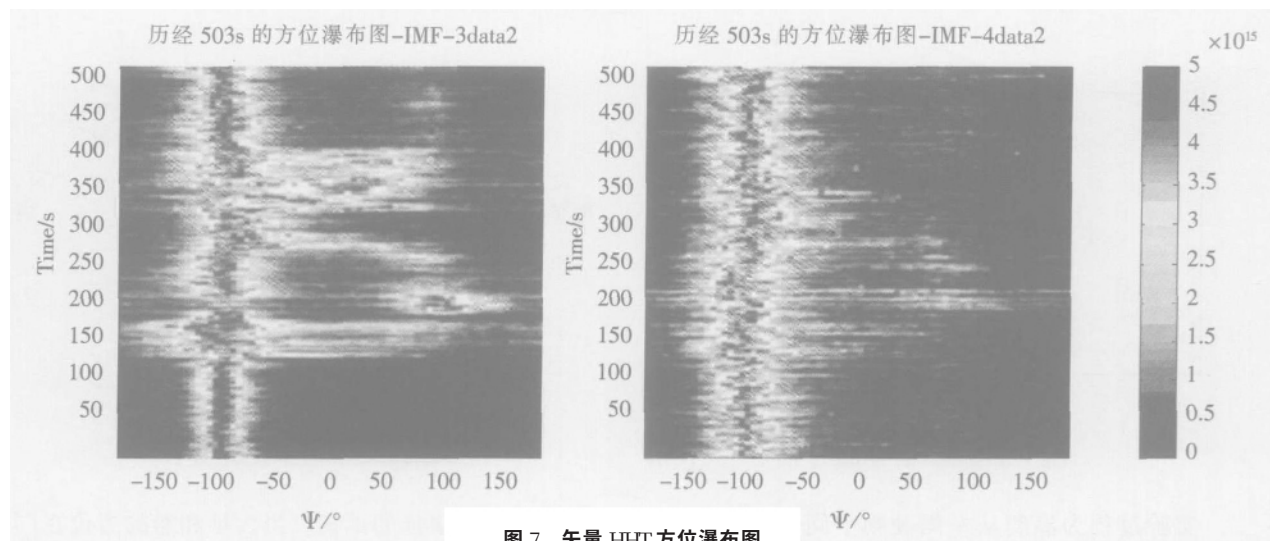


图 7 矢量 HHT 方位瀑布图

Fig.7 Vector HHT azimuth waterfall map

图 7 是矢量 HHT 的处理结果。图中上左为 IMF1, 上右为 IMF2, 下左为 IMF3, 下右为 IMF4。大坝是一个宽带强目标, 从图中可见大坝信号的能量基本都被分在了 IMF3 和 IMF4 中, 尤其是 IMF4 中可以清晰地看到只有一个目标--大坝。而目标船的能量则基本分布在 IMF1 和 IMF2 中, 前两个 IMF 中可以较清晰地看到船的轨迹, 但由于大坝的干扰轨迹有间断现象。

6 结 论

本文提出了矢量信号处理与 HHT 相结合的矢量 HHT 方法, 其继承了 HHT 和矢量信号处理各自的优势。

首先 IMF 的定义突破了传统上将幅值不变的简谐信号定义为基底的局限, 通过希尔伯特变换得到的瞬时频率、瞬时能量和瞬时方位具有清晰的物理意义^[6], 为信号处理提供了丰富的信息量。

其次 HHT 没有固定的先验基底, 是自适应的。IMF 是基于序列数据的局部时间特征而得出的, 每一个 IMF 可以看作是信号中一个固有的振荡模式, 其对应于某个目标的固有振荡, 不仅可以是线性、平稳信号也可以是非线性、非平稳信号^[5], 且不是严格按频段来分割。与传统方法相比, 矢量 HHT 的方法能更好分离不同目标的信号, 尤其是非线性、非平稳信号。由于实际信号大多数是非线性、非平稳的, 因此矢量 HHT 对于实际信号处理有较好的效果。

综上所述, HHT 与矢量信号处理相结合的矢量 HHT 的方法在单矢量传感器的情况下, 有着较好的多目标分辨能力。

参 考 文 献

- [1] 冯海泓, 梁国龙. 目标方位的声压、振速联合估计[J]. 声学学报, 2000, 25(6): 516-520.
FENG Haihong, LIANG Guolong. The direction estimation using combined sensor with pressure and particle velocity[J]. ACTA Acoustic, 2000, 25(6): 516-520.
- [2] 姚直象, 惠俊英, 王德俊, 蔡平. 单矢量水听器时域和频域双目标分辨能力比较[J]. 声学技术, 2004, (23): 222-226.
YAO Zhixiang, HUI Junying, WANG Dejun, CAI Ping. Perform comparing about two targets partition by a single vector hydrophone in time-domain and frequency-domain[J]. Technical Acoustics, 2004, (23): 222-226.
- [3] 姚直象, 惠俊英, 王德俊, 蔡平. 基于 DEMON 线谱的单矢量水听器双目标分辨[J]. 应用声学, 2005, 24(3): 171-176.
YAO Zhixiang, HUI Junying, WANG Dejun, CAI Ping. Identify two targets by a single vector hydrophone based on DEMON spectrum[J]. Applied Acoustic, 2005, 24(3): 171-176.
- [4] 杨士莪. 单矢量水听器多目标分辨的一种方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(6): 591-595.
YANG shie. Method of multi-sources distinguishing by single vector transducer[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2003, 24(6): 591-595.
- [5] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-station time series analysis[J]. Proc R Soc, 1998, A454: 903-995.6.
- [6] 丁康. 平稳和非平稳振动信号的若干处理方法及发展[J]. 振动工程学报, 2003, 16(1): 1-10.
DING kang. Development in Vibration Signal Analysis and Processing Methods[J]. Journal of Vibration Engineering, 2003, 16(1): 1-10.