

Hilbert-Huang 变换在瞬态信号检测中的应用

杨 振¹, 邹 男^{2,3}, 付 进^{2,3}

(1. 中国人民解放军 91388 部队, 广东湛江 524022; 2. 哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001;
3. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 空投物体入水时产生具有时域冲击特性的信号, 一般称之为瞬态信号。Hilbert-Huang 变换可通过经验模态分解和 Hilbert 谱分析两种方法, 从时频角度对瞬态信号进行分析。介绍了 Hilbert-Huang 变换的基本原理, 建立了瞬态信号的数学模型, 提出了基于 Hilbert-Huang 变换的信号重构瞬态信号检测方法, 并与传统能量检测器的性能进行了对比分析, 最后通过软件仿真和湖试数据处理验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: Hilbert-Huang 变换; 瞬态信号检测; 信号重构; 能量检测器

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-02-0167-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.02.013

The application of Hilbert-Huang transform in transient signal detection

YANG Zhen¹, ZOU Nan^{2,3}, FU Jin^{2,3}

(1. Unit 91388, The People's Liberation Army of China, Zhanjiang 524022, Guangdong, China;

2. Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

3. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract: When an object airdropped into the water, some signals with impact characteristics in time domain will be generated, which are commonly known as transient signals. Hilbert-Huang Transform could analyze the transient signals in time-frequency domain by empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis. The principle of Hilbert-Huang Transform is introduced, and the mathematic model of transient signal is formed. A new method of transient signal detection based on Hilbert-Huang Transform is proposed, whose performance is analyzed and compared with that of the traditional energy detector. Finally the feasibility and validity of the method are verified by the software simulation and the data processing of lake experiment.

Key words: Hilbert-Huang transform; transient signal detection; signal reconstruction; energy detector

0 引言

随着潜艇降噪和吸声技术的迅猛发展^[1], 水下目标检测变得越发困难, 区别于传统的辐射噪声检测, 科学家已着眼于捕获潜艇变速所产生的瞬态信号^[2-4]; 反潜技术成为近年来的研究热点, 空投鱼雷、吊放声呐等目标的检测是传统检测方法的盲区^[1]; 在水下靶场技术中, 精确定位导弹入水方位是十分重要的; 爆炸声信号在资源勘探中的应用也越来越广泛^[5]。而以上种种信号都属于瞬态信号, 因此瞬态信号检测已成为水声领域的一项关键技术。与稳态信号不同, 瞬态信号持续时间很短, 属于非线性、

非平稳信号, 这也是瞬态信号检测的难点所在。美国华裔科学家 E. Huang 等人提出的 Hilbert-Huang 变换(Hilbert-Huang Transform, HHT), 摆脱了传统傅里叶变换线性平稳系统的局限, 赋予频谱新的物理意义。研究证明了 HHT 是一种真正意义上的自适应算法, 适用于频率随时间变化的非线性、非平稳信号的处理^[6-8]。

本文介绍了 HHT 的基本算法, 并基于水声瞬态信号的数学模型, 利用 HHT 的滤波特性, 提出了一种基于 HHT 信号重构思想的瞬态信号检测方法。仿真构建了能量检测器, 并通过 HHT 信号重构, 改善了能量检测器的性能, 并通过了湖试数据的验证。

1 Hilbert-Huang 变换时频分析方法

HHT 基于两种新方法——经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)和 Hilbert 谱

收稿日期: 2014-03-05; 修回日期: 2014-07-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51209059, 61201411)、国家“863 计划”资助项目(2013AA09A503)

作者简介: 杨振(1973—), 男, 江西南城人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水声信号处理技术。

通讯作者: 邹男, E-mail: zounan@hrbeu.edu.cn

分析, 该时频分析方法克服了傅里叶变换平稳线性的局限, 已被广泛应用于许多领域。图 1 为 HHT 的流程图。其中, EMD 分解结果为固有模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF)。

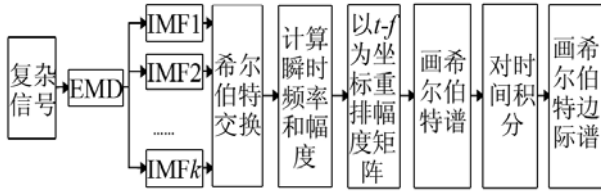


图 1 HHT 一般流程图
Fig.1 Ecumenical flow chat of HHT

1.1 EMD 算法

EMD 的具体步骤如下:

- (1) 找到输入信号 $X(t)$ 所有的局部极点, 用插值连接所有局部极大值点作为上包络, 连接所有局部极小值点作为下包络, 上下包络均值设为 m_1 ;
- (2) 计算 $h_1 = X(t) - m_1$;
- (3) 再将 h_1 作为输入, 重复(1)、(2)两过程, 直至第 k 次提取出的信号 h_k 满足 IMF 条件, 定义 c_1 为第一阶 IMF, 记 $c_1 = h_k$ 。
- (4) 将得到的周期较短的 IMF 分量从 $X(t)$ 中分离出来, 即 $X(t) - c_1 = r_1$ 。
- (5) 将余量作为新的信号重复步骤(1)~(4), 得到各阶 IMF, 直至满足分解终止条件, EMD 终止。

图 2 为 EMD 算法流程。

1.2 Hilbert 谱分析

信号通过 EMD 获得了 IMF 分量后, 对每阶 IMF 作 Hilbert 变换, 并对瞬时相位求导, 计算瞬时频率 $\omega(t)$ 。用“RP”表示取实部, 进而将信号表示为如下形式:

$$X(t) = \text{RP} \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i \int \omega_j(t) dt} \quad (1)$$

式中省略了残余项 r_n , 给出了每个分量幅度和频率

的时间函数, 可以将最终能量曲线表示在频率-时间-幅度的三维空间上。用时-频分布来描述信号幅度的谱图称为 Hilbert 幅度谱, 记为 $H(\omega, t)$, 简称 Hilbert 谱。假如用幅度的平方表示能量, 那么幅度平方的时频分布就是 Hilbert 能量谱。

对 Hilbert 谱做时间积分, 可以得到 Hilbert 边际谱, 记为 $h(\omega)$ 。

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (2)$$

式中, T 是信号持续时间。Hilbert 边际谱为整个信号在每个频点上总的幅度(能量)提供了量度, 在统计意义上表示了整个时间跨度上信号幅度的累积。

2 瞬态信号模型

瞬态信号持续时间很短, 往往只有几毫秒到几十毫秒, 是典型的非线性非平稳信号。根据水声瞬态信号的物理机制, 本文采用的瞬态信号模型为三个不同起始时刻的指数衰减正弦曲线之和^[9], 表达式为:

$$s(t) = \sum_{k=1}^3 a_k e^{-\lambda_k(t-\tau_k)} \cos[2\pi f_k(t-\tau_k) + \varphi_k] \quad (3)$$

式中: a_k 和 τ_k 分别表示第 k 个分量对应的幅度系数和延时, $a_1=1, a_2=0.5, a_3=0.8, \tau_1=0.004 \text{ s}, \tau_2=0.0025 \text{ s}, \tau_3=0.001 \text{ s}$; 采样频率 $f_s=96 \text{ kHz}$, 各分量调制频率为 $f_1=3 \text{ kHz}, f_2=7 \text{ kHz}, f_3=4 \text{ kHz}$; λ_k 控制各分量幅度的衰减速度, 称为幅度衰减因子, $\lambda_1=450, \lambda_2=750, \lambda_3=600$; 初相位 $\varphi_1=\pi/6, \varphi_2=\pi/4, \varphi_3=\pi/2$; 信号持续时间为 5 ms, 如图 3 所示。

3 仿真分析

3.1 声场控制方程瞬态信号的传统能量检测

在高斯白噪声背景和最大输出信噪比准则下,

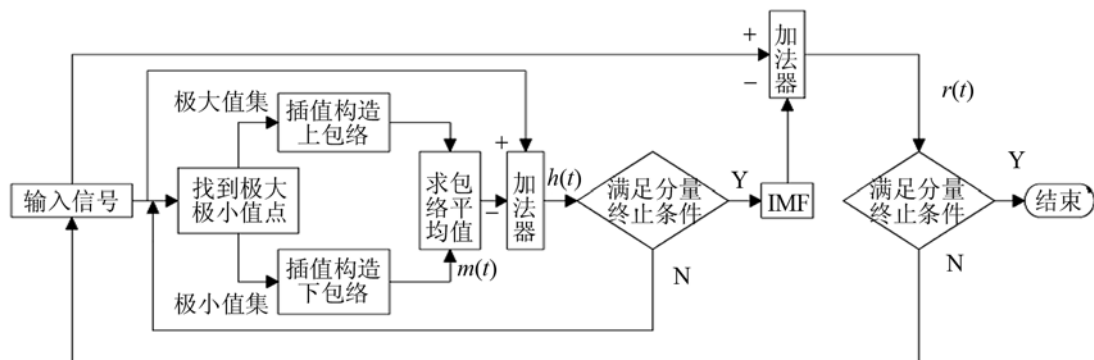


图 2 EMD 算法流程图
Fig.2 Flow chart of EMD algorithm

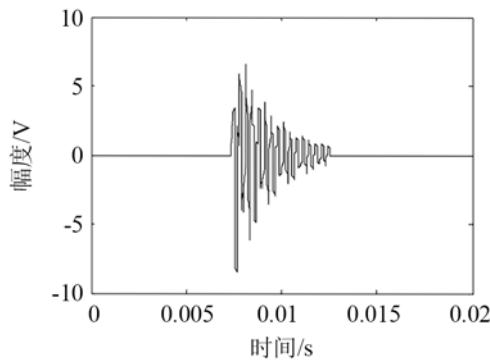


图 3 水声瞬态信号模型

Fig.3 Mode of transient underwater acoustic signal

确知瞬态信号的最佳接收机是匹配滤波器，而对没有任何先验知识的瞬态信号，匹配滤波器的性能会迅速下降，因此工程上通常采用能量检测器。为了防止尖脉冲产生虚警，同时采用鉴宽器作辅助判决。能量检测器结构如图 4 图所示。

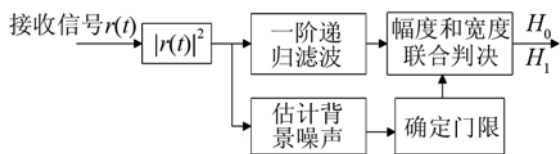


图 4 检测器结构图

Fig.4 Structure of detector

结合图 4 给出瞬态信号检测仿真实例，仿真结果如图 5 所示，信号加入了高斯白噪声，信噪比为 0 dB。

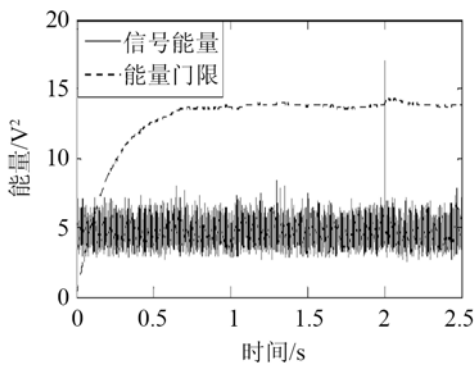


图 5 信号能量检测仿真结果

Fig.5 Simulation result of energy detection

3.2 基于 Hilbert-Huang 变换的瞬态信号检测

噪声是影响信号处理效果的主要原因之一，降噪是提高系统检测性能的最基本也是最有效的手段。一直以来，HHT 被广泛认为是“滤波器”，有很好的降噪效果，但它与传统的滤波器有很大区别。传统的滤波器是以频谱为基础，在滤波器通带外的频率分量被滤除。而 HHT 是以局部时间尺度为基础，将各局部时间尺度内的最大频率分量先分

解出来，同一 IMF 中各局部的频率未必相等，得到的信号可以是窄带信号，也有可能是覆盖整个频率范围的宽带信号。可以利用 HHT 的这一特性，去除只含有噪声的 IMF 分量，将其余 IMF 分量进行信号重构来提高信噪比，具体过程如下：

- (1) 对采样信号进行 EMD 分解；
- (2) 去除只含噪声的 IMF 分量，重构信号，记为 $y(t)$ ；
- (3) 对 $y(t)$ 进行传统能量检测。

根据上述步骤检测瞬态信号，同样加入全频带 0 dB 高斯噪声。一般在第 3 阶或第 4 阶 IMF 开始出现信号，此处采用第 4 阶至最后一阶 IMF(不包含残余项)进行信号重构，得重构信号 $y(t)$ 如图 6 所示。对重构信号进行能量检测，仿真结果如图 7 所示。

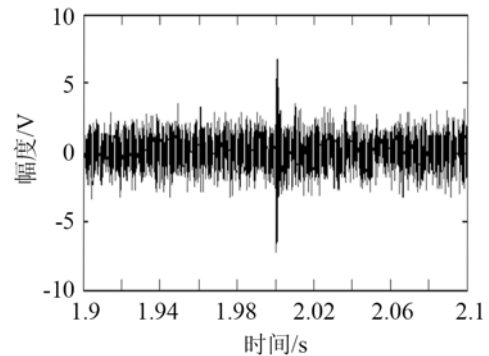


图 6 重构信号

Fig.6 Reconstruction signal

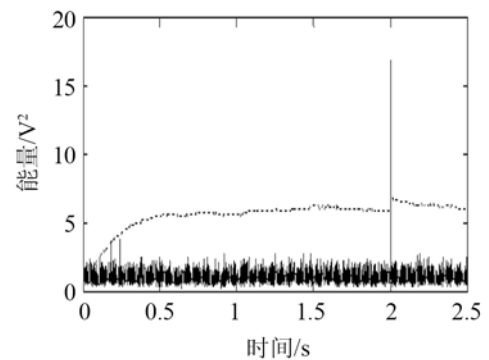


图 7 重构信号能量检测仿真结果

Fig.7 Simulation result of energy detection of reconstruction signal

3.3 性能分析

对比图 5、7 可以发现，噪声能量降低了近 5 倍，而信号能量基本没有衰减。

另外通过绘制相同条件下能量检测与信号重构能量检测的接收机工作特性曲线，对两者的性能进行比较，统计次数为 500 次。结果如图 8 所示。

图 8 是分别在 -6、-8、-10 dB 信噪比下得到的性能曲线。可见，随着 SNR 的下降，两种方法的性能都有所下降，传统能量检测的性能下降很快，

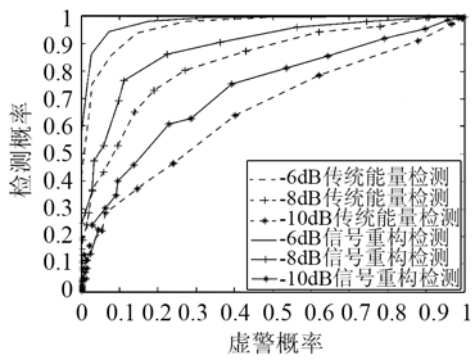


图 8 传统能量检测与基于 HHT(信号重构)检测的 ROC 曲线
Fig.8 ROCs of traditional energy detection and HHT (reconstruction) detection

而基于 HHT 信号重构思想的检测方法性能相对下降较慢。

4 湖试数据处理与性能分析

湖试数据为空投物体入水声，信号波形如图 9 所示。

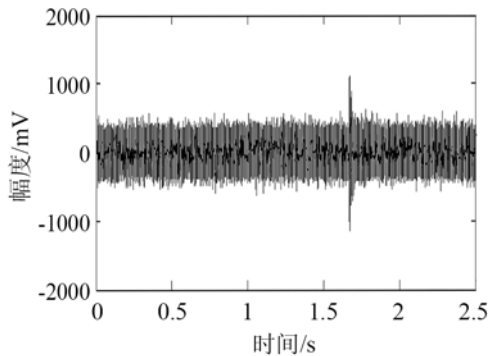


图 9 湖试信号波形
Fig.9 Signal wave from the lake test

同前文所述的传统能量检测和基于 HHT 信号重构的检测方法，对湖试数据进行处理，其结果如图 10、11、12 所示。

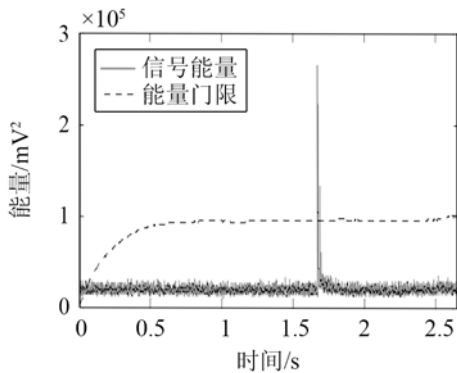


图 10 传统能量检测结果
Fig.10 Result of traditional energy detection

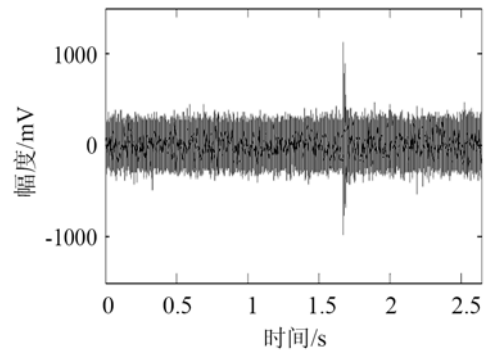


图 11 Hilbert-Huang 变换能量检测重构信号
Fig.11 Reconstruction signal of HHT energy detection

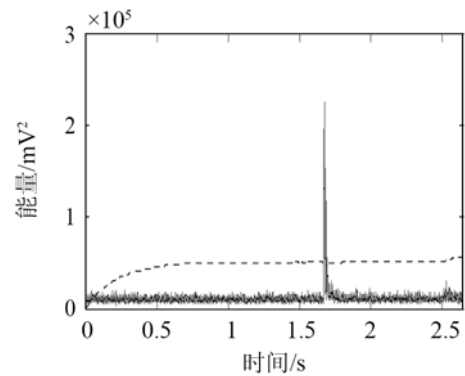


图 12 重构信号能量检测仿真结果
Fig.12 Result of energy detection of reconstruction signal

为进一步体现传统检测方法和基于信号重构方法的检测性能，在带噪湖试数据的基础上，加入信噪比为-7、-9 dB 的高斯白噪声。传统能量检测与信号重构检测的接收机工作特性曲线(Receiver Operation Characteristic Curve, ROC)如图 13 所示。

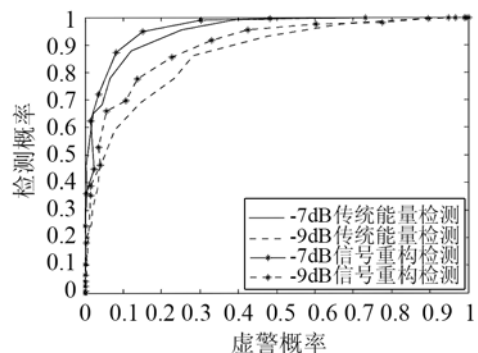


图 13 能量检测与信号重构瞬态信号检测的 ROC 曲线
Fig.13 ROCs of energy detection and reconstruction signal detection

湖试数据处理与仿真分析结果基本一致，信号重构使瞬态信号检测性能有所改善。

5 结论

本文基于 HHT 的基本原理和水声瞬态信号的

数学模型, 提出了一种基于 HHT 信号重构思想的瞬态信号检测方法。该方法利用 HHT 的滤波特性, 通过 EMD 分解出的 IMF 完成信号重构, 并结合能量检测器实现水声瞬态信号检测。仿真分析和湖试数据处理结果表明, 该方法相对于传统的能量检测器性能有所改善。

参 考 文 献

- [1] 杨日杰, 高学强, 韩建辉. 现代水声对抗技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 71-72.
YANG Rijie, GAO Xueqiang, HAN Jianhui. Modern acoustic warfare technology and application[M]. Beijing: National defence industry press, 2008: 71-72.
- [2] 李秀坤, 李婷婷, 夏峙. 水下目标特性特征提取及其融合[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(7): 903-908.
LI Xiukun, LI Tingting, XIA Zhi. Feature extraction and fusion based on the characteristics of underwater targets[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(7): 903-908.
- [3] 王燕, 林旺生, 梁国龙, 等. 声线弯曲对同步水声定位系统影响分析及修正[J]. 声学技术, 2009, 28(5): 123-124.
WANG Yan, LIN Wangsheng, LIANG Guolong, et al. The influence and revision of ray bending in synchronous underwater acoustic positioning system[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(5): 123-124.
- [4] 王燕, 邹男, 付进, 等. 基于局部瞬时能量密度级的瞬态信号检测方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(7): 1720-1724.
WANG Yan, ZOU Nan, FU Jin, et al. Transient signal detection method based on partial instantaneous energy density level[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(7): 1720-1724.
- [5] 王逸林. 希尔伯特黄变换在矢量信号处理中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
WANG Yilin. Research on the application of Hilbert-Huang Transformation to vector signal processing[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.
- [6] Tsakalozos Nikolaos, Drakakis Konstantinos, and Rickard Scott. A formal study of the nonlinearity and consistency of the Empirical Mode Decomposition[J]. Signal Processing, 2012, 92(9): 1961-1969.
- [7] Bouzid, Ellouze. Maximum Error in Discrete EMD Decomposition of Periodic Signals[C]// Digital Signal Processing 15th International Conference, Cardiff, 2007: 563-566.
- [8] Bouchikhi, Abdelkhalek. Multicomponent. AM-FM signals analysis based on EMD-B-splines ESA[J]. Signal Processing, 2012, 92(9): 2214-2228.
- [9] 穆玉涛, 方世良. Hilbert-Huang 变换在水声瞬态信号处理中的应用[J]. 声学技术, 2007, 26(5): 992-993.
MU Yutao, FANG Shiliang. Application of Hilbert-Huang transform in underwater transient signal processing[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(5): 992-993.