

基于局部瞬时能量密度级的瞬态信号检测方法

王燕 邹男 付进* 梁国龙

(哈尔滨工程大学水声技术重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要:为实现低信噪比条件下的水声瞬态信号检测,该文提出子波检测和局部瞬时能量密度级双重降噪方法。该双重降噪方法通过自适应选取含有有用信号的某阶固有模态函数(IMF),计算 Hilbert 能量谱并进行局部积分,滤除子波检测残留下来的带外噪声。此外,结合宽度-包络联合检测机制,构造了水声瞬态信号局部瞬时能量密度检测器。湖试数据处理结果表明,局部瞬时能量密度检测器可有效降噪并在低信噪比条件下提取瞬态信号,较传统能量检测器具有更好的检测性能。

关键词: 信号检测; 瞬态信号; Hilbert-黄变换; 子波检测; 局部瞬时能量密度级; 能量检测器

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)07-1720-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01239

Transient Signal Detection Method Based on Partial Instantaneous Energy Density Level

Wang Yan Zou Nan Fu Jin Liang Guo-long

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to detect acoustic transient signal at low SNR, a double noise reduction method of sub-wave detection and partial instantaneous energy density level is proposed. A certain order of Intrinsic Mode Function (IMF) containing useful signal is selected adaptively. Then Hilbert energy spectrum is calculated and integrated partially to filter out the residual out-of-band noise. In addition, an acoustic transient signal partial instantaneous energy density detector is established combined with width-envelope detection tactics. Lake trial data processing results show that the partial instantaneous energy density detector can reduce noise effectively and extract transient signal at low SNR. It has better performance than the traditional energy detector.

Key words: Signal detection; Transient signal; Hilbert-Huang Transform (HHT); Sub-wave detection; Partial instantaneous energy density level; Energy detector

1 引言

瞬态信号可以由空投物体入水、水下航行体点火启动或变速转向、冰层破裂、鲸豚鸣叫等产生^[1],蕴含着丰富的海洋信息,可用于目标识别^[2]、定位^[3]、导航^[4]等,具有很强的研究价值和广泛的应用前景。

瞬态信号持续时间短,通常只有几毫秒,是典型的非平稳信号,使得经典的信号处理方法对此失效。目前对瞬态信号的检测方法主要有传统能量检测法、短时相关法^[5]、Power-Law^[6]等。能量检测法实现简单,但对信噪比要求较高;短时相关法通过对数据进行简单的分段相关处理,依据一定的统计估计实现高正确率检测,但“分段”破坏了频率分辨率;Power-Law 检测器将高斯背景下的瞬态信号

检测问题归结为 N 点 DFT 数据中任意 M 点信号的检测,特别适于检测未知物理过程产生的瞬态信号,但 Power-Law 检测器在色噪声环境下性能会迅速下降。越来越受到学者关注的是各种具有良好自适应能力的、直观的时频分析方法或复合检测方法。希尔伯特-黄变换(HHT)^[7,8]摆脱了传统傅里叶变换只适用于线性平稳系统的局限,将固有模态函数作为基本信号,是一种真正基于瞬时频率的、非线性的自适应信号处理方法。

为提高对水声微弱瞬态信号的检测能力,本文以 HHT^[9,10]为理论依据,提出了基于局部瞬时能量密度级的水声瞬态信号检测方法。提出了子波检测方法,并在此之上实现了经验模态分解(EMD)的自适应降噪;通过 Hilbert 能量谱的局部频段积分,从频域上实现了局部瞬时能量密度级降噪。最后结合宽度和局部能量密度级包络联合检测方法,实现了对水声瞬态信号的自适应检测器,并通过了湖试数据验证。

2012-09-25 收到, 2013-03-07 改回

国家自然科学基金(51209059, 51279043)和水声技术重点实验室基金(9140C200203110C2003)资助课题

*通信作者: 付进 fujin@hrbeu.edu.cn

2 算法描述

2.1 EMD 自适应降噪

环境噪声分布在整个时间尺度，而我们关心的水声瞬态信号通常处于大时间尺度，即存在于 EMD 分解的较高阶固有模态函数(IMF)中^[11,12]。而对于不同噪声环境和瞬态信号形式，有效 IMF 的阶数是变化的，若去除固定的阶次则会损失信噪比^[13]。

从瞬时能量的角度分析，若第 i 阶 IMF 无信号存在，则瞬时功率可表示为

$$N_i(k) = P_{ni}(k), \quad k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (1)$$

若有信号存在，则瞬时功率为

$$N_i(k) = P_{ni}(k) + P_{si}(k), \quad k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2)$$

$P_{ni}(k)$ 和 $P_{si}(k)$ 分别表示第 i 阶 IMF 中噪声和信号在 k 时刻的功率。作以下判定：

$$\left. \begin{aligned} \max_{0 \leq k < M} (N_i(k)) > \lambda_i, \quad \text{检测到} \\ \max_{0 \leq k < M} (N_i(k)) \leq \lambda_i, \quad \text{未检测到} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中 λ_i 为第 i 阶 IMF 的自适应门限，它是第 i 阶 IMF 平均功率估值的 σ 倍。子波检测门限的估计方法如下：

首先估计各阶 IMF _{i} 的瞬时功率：

$$N_i(k) = |\text{IMF}_i(k)|^2, \quad k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (4)$$

对瞬时功率做 L 点滑动平均，记为 $W_i(k)$ ：

$$W_i(k) = \sum_{i=0}^{L-1} N_i(k-i) / L, \quad k = L-1, L, \dots, M-1 \quad (5)$$

则门限 λ_i 为

$$\lambda_i = \sigma \times \sum_{k=L-1}^{M-1} W_i(k) / (M-L) \quad (6)$$

其中 σ 为门限系数，选择过低的门限系数会使无用的 IMF 信息进入检测器从而降低检测概率，过高又可能丢失信息，因此 σ 的选取是影响 EMD 自适应降噪效果的重要因素。根据恒虚警理论，一般经验值为 8~16。当 $N_i(k)$ 的最大值大于门限时，则认为有效的 IMF 分量。至此，EMD 降噪过程可归纳如下：

- (1)对输入信号做 EMD 分解；
- (2)根据式(4)计算各阶 IMF 瞬时功率，搜索最大值；
- (3)根据式(5)，式(6)估计子波检测门限 λ_i ；
- (4)子波检测，各阶 IMF 瞬时功率最大值与门限比较，做信号有无的二元判决，确定有效 IMF 分量，剔除其余。

2.2 局部瞬时能量密度级降噪

在 Hilbert 谱分析中，瞬时能量密度级 IE 被定义为时间的函数，用以考察能量的波动程度^[7]：

$$IE(t) = \int_{\omega} |H(\omega, t)|^2 d\omega \quad (7)$$

其中 $H(\omega, t)$ 为信号的 Hilbert 谱。由于水声瞬态信号处于中低频段，根据此先验条件，将式(7)中的积分限由全积分改为局部积分，得到局部瞬时能量密度级对应的数字域表述：

$$ie(k) = \sum_{i=p}^q |H'(\omega_i, t_k)|^2, \quad k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (8)$$

其中 $H'(\omega_i, t_k)$ 为有效 IMF 对应的 Hilbert 谱，求和范围的选择与采样频率 f_s 和 Hilbert 谱频率精度系数 N 有关。若积分范围为 $[f_1, f_2]$ ，则

$$\left. \begin{aligned} p &= \lfloor f_1 / (f_s / N) \rfloor \\ q &= \lceil f_2 / (f_s / N) \rceil \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$\lfloor \cdot \rfloor$ 和 $\lceil \cdot \rceil$ 分别表示向下和向上取整。

为降低计算量，需要限制 EMD 分解终止的阶数，因此声呐设备接收的主要低频噪声与有用信号一同被保留了下来。本节提出的局部瞬时能量密度级降噪方法，相当于一个带通滤波器，可将瞬态信号频段外的噪声剔除，解决了 EMD 降噪的残余噪声问题，进一步提高了信噪比。

3 局部瞬时能量密度检测器

本文构建的局部瞬时能量密度检测器首先按上述方法实现瞬态信号的双重降噪，将得到的局部瞬时能量密度级通过不同积分时间的一阶递归滤波器，分别计算包络和门限。滤波表达式为

$$y(n) = \frac{m-1}{m} y(n-1) + \frac{1}{m} x(n) \quad (10)$$

其中 x 为滤波输入， y 为滤波输出， m 代表了积分时间，短时间积分估计信号包络，长时间积分估计背景噪声，确定能量检测门限。图 1 给出了结合宽度-包络联合检测的局部瞬时能量密度检测流程图。

4 实验分析

4.1 湖试数据处理

利用 2009 年 9 月在吉林松花湖采集的 20 组数据来分析瞬态信号检测方法。信号持续时间均在 2 ms 以内，是典型的水声瞬态信号，图 2 所示为其中 6 组数据的时域波形。

因湖试实测信号信噪比较高，处理结果不能充分体现本文算法的性能。因此对第 1 组原始信号加入白噪声，其时域波形及 EMD 分解结果如图 3 所示，此处限制 EMD 终止阶数为 5 阶。

图 3 由上至下依次是输入信号，IMF₁~IMF₅ 和余量。可见，几乎被噪声淹没的瞬态信号在高阶分量中清晰可见。取 $\sigma = 9$ ，对图 3 分解结果做子波检测，在第 5 阶 IMF 和余量中检测到信号，大部分

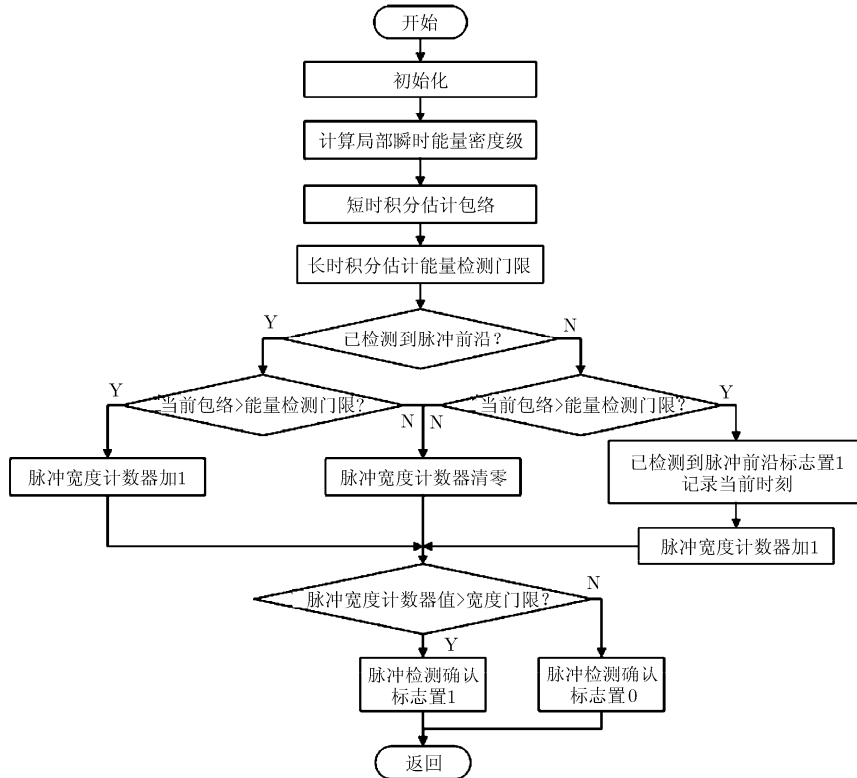


图 1 局部瞬时能量密度检测器工作流程图

噪声随低阶 IMF 被剔除。图 4 给出了 EMD 自适应降噪前后的 Hilbert 谱, 可见大部分高频噪声被抑制, 低频有所改善, 但仍有部分噪声残留。

水声瞬态信号处于中低频段, 在 1~10 kHz 频段做局部积分, 得到的局部瞬时能量密度级包络与传统能量包络对比如图 5 所示, 可见本文提出的双重降噪方法有效地实现了瞬态信号降噪, 信号与噪声的峰值能量比由 2.6076 提高到 10.1296。

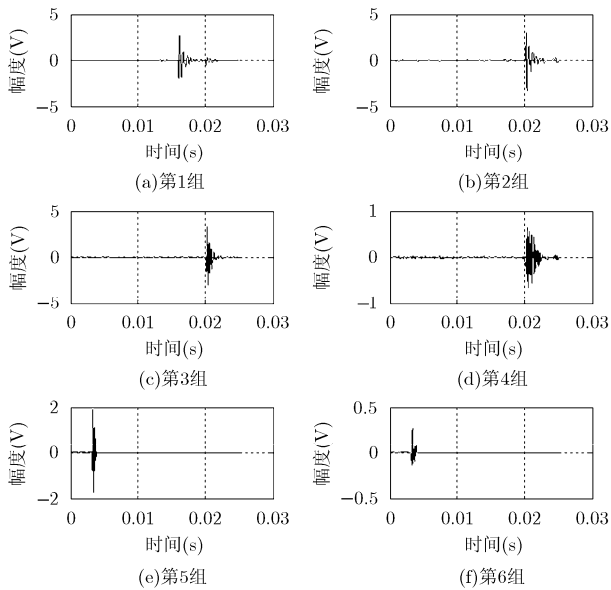


图 2 6 组瞬态信号时域波形

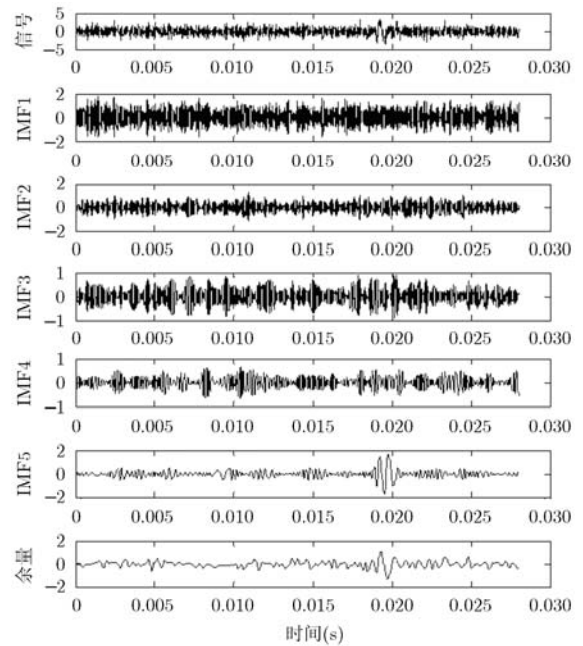


图 3 输入信号及 EMD 分解结果

4.2 性能分析

为充分分析算法的性能, 向 20 组瞬态信号中加入一定信噪比的白噪声, 通过绘制相同条件和判决逻辑下, 传统能量检测器与局部瞬时能量密度检测器的接收机工作特性曲线(ROC), 对二者的性能进行比较, 做 1000 次统计, 结果如图 6 所示。

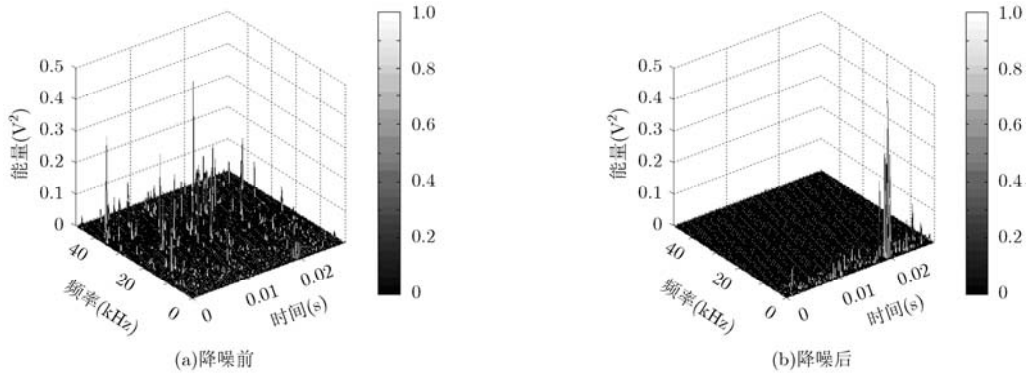


图 4 EMD 自适应降噪前后对比图

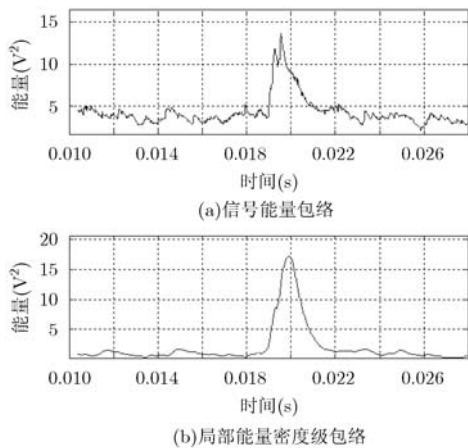


图 5 瞬态信号局部能量密度级包络与传统能量检测包络

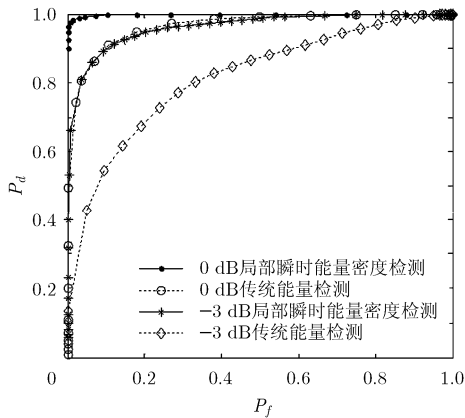


图 6 接收机工作特性曲线

图 6 所示的统计分析结果表明，本文提出的具有双重降噪能力的局部瞬时能量密度瞬态信号检测器优于传统能量检测器，信噪比提高约 3 dB。

5 结束语

本文针对微弱水声瞬态信号的检测问题，提出了具有双重降噪能力的局部瞬时能量密度检测法。理论分析和试验结果表明，通过子波检测实现的

EMD 自适应降噪方法，可有效地去除信号中的高频噪声和部分低频噪声；对 Hilbert 谱做局部积分得到局部瞬时能量密度级，利用水声信号所处中低频段的先验知识，可以滤除频段范围以外的高频和低频噪声，解决了 EMD 降噪的低频残余噪声问题；基于上述双重降噪方法，将局部瞬时能量密度级包络作为检测统计量，统计 ROC 曲线表明，本文提出的瞬态信号检测方法较传统能量检测器的性能提高约 3 dB。

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 Ri-jie, Gao Xue-qiang, and Han Jian-hui. 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 Xiu-kun, Li Ting-ting, and 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 Wang-sheng, Liang Guo-long, et al. The influence and revision of ray bending in synchronous underwater acoustic positioning system[J]. *Technical Acoustics*, 2009, 28(5): 123-124.

[4] Hikmet Y and Guray Y. Development of a GPU accelerated terrain referenced UAV localization and navigation algorithm [J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 2013, 70(1-4): 477-489.

[5] 李梅, 姚蓝. 基于短时相关法的瞬态信号检测[J]. 声学技术, 2002, 21(增刊): 101-102.
 Li Mei and Yao Lan. Detection of transient signal based on short-time correlation[J]. *Technical Acoustics*, 2002,

- 21(Suppl.): 101-102.
- [6] 吕俊军, 吴国清, 杜波. 非高斯水声瞬态信号 Power-Law 检测[J]. 声学学报, 2004, 29(4): 359-361.
Lü Jun-jun, Wu Guo-qing, and Du Bo. Non-Gaussian underwater transient signals detection using Power-Law detector[J]. *Acta Acoustica*, 2004, 29(4): 359-361.
- [7] Huang N E, Shen Z, and Long S R, *et al.*. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 1998, 454(1971): 903-995.
- [8] Nikolaos T, Konstantinos D, and Scott R. A formal study of the nonlinearity and consistency of the empirical mode decomposition[J]. *Signal Processing*, 2012, 92(9): 1961-1969.
- [9] Bouzid A and Ellouze N. Maximum error in discrete EMD decomposition of periodic signals[C]. Digital Signal Processing 15th International Conference, Cardiff, 2007: 563-566.
- [10] Bouchikhi A and Boudraa A O. Multicomponent AM-FM signals analysis based on EMD-B-splines ESA[J]. *Signal Processing*, 2012, 92(9): 2214-2228.
- [11] Rilling G, Flandrin P, and Goncalves P. On empirical mode decomposition and its algorithms[C]. Proceedings of IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing NPSIP-3, San Francisco, 2003: 444-447.
- [12] 王逸林. 希尔伯特黄变换在矢量信号处理中的应用研究[D]. [博士学位论文], 哈尔滨工程大学, 2006.
Wang Yi-lin. Research on the application of Hilbert-Huang Transformation to vector signal processing[D]. [Ph. D. dissertation], Harbin Engineering University, 2006.
- [13] Kopsinis Y and McLaughlin S. Enhanced empirical mode decomposition using a novel sifting-based interpolation points detection[C]. Statistical Signal Processing, SSP'07, IEEE/SP 14th Workshop, Madison, 2007: 725-729.
- 王 燕: 女, 1973 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水声信号处理、水声工程、水声定位与通信.
- 邹 男: 女, 1986 年生, 博士生, 研究方向为水声信号处理、水声通信.
- 付 进: 女, 1981 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为水声目标探测与定位.
- 梁国龙: 男, 1964 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水声信号处理、水声工程、水声定位与导航、水声通信.