

文章编号 1004-924X(2013)02-0479-09

激光超声信号去噪的经验模态分解实现及改进

罗玉昆*, 罗诗途, 罗飞路, 潘孟春

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 考虑激光超声检测过程中噪声对缺陷和材料特征分析和检测的影响, 本文以激光超声信号去噪为目的, 研究了基于经验模态分解(EMD)的激光超声信号时间尺度滤波过程。针对分解过程中固有模态函数(IMF)上有效信号与噪声的混叠现象对重构信噪比的影响, 结合信号多模态和宽频带的特点, 提出了基于峰度检验策略的时域加窗方法。该方法通过局部峰度检验判断重构起点附近 IMF 中有效信号的位置及信噪分界点, 利用 Turkey-Hanning 窗保存有效信号, 抑制噪声, 实现信号与噪声的解混叠, 改善重构信号质量。仿真和实验结果表明, 该方法具有良好的自适应性, 有效识别并分离了信号和噪声成分, 信噪改善比达 14 dB 以上, 相对原始方法提升了 3 dB, 相对性能增强了 20%, 并且改进效果随信号受污染程度的加重而愈发突出, 有望在高噪声水平下发挥优势。

关键词: 激光超声; 信号去噪; 经验模态分解; 峰度检验; 时域加窗

中图分类号: TN249; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132102.0479

Realization and improvement of laser ultrasonic signal denoising based on empirical mode decomposition

LUO Yu-kun*, LUO Shi-tu, LUO Fei-lu, PAN Meng-chun

(College of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

* Corresponding author, E-mail: luoyukun4580@hotmail.com

Abstract: To suppress the influence of noises associated with a laser ultrasonic testing process on the detection for defects and material parameters, the time-scale filtering process of laser ultrasonic signals is studied based on Empirical Mode Decomposition (EMD). As the aliasing between useful signals and noises in Intrinsic Mode Functions (IMF) will reduce the reconstruction signal-to-noise ratio, a time-windowing method with kurtosis test strategy is proposed considering the multi-mode and broad-band characteristics of laser ultrasonic signals. With proposed method, the positions and boundaries of useful signals in IMFs near the reconstruction start are estimated by computing the local kurtosis values. Then, a Turkey-Hanning window is used to preserve useful signals and suppress the noises. Thus, aliasing removal is achieved and the reconstruction signal quality is improved. Simulation and experimental data show that the method proposed has a good self-adaptability, and it recognizes and separates the signal and noise components effectively. The signal-to-noise improvement factor is

收稿日期: 2012-10-25; 修订日期: 2012-11-14.

基金项目: 中国博士后科学基金面上资助项目 (No. 20100481509)

over 14 dB, which improves the original method by 3 dB and enhances the performance by 20%. Besides, as the heavier the signal is polluted, the better the improving effect is, the advantage of the method is expected to be given in high noise levels.

Key words: laser ultrasonic; signal denoising; Empirical Mode Decomposition(EMD); kurtosis test; windowing in time domain

1 引言

激光超声检测通过脉冲和连续激光来实现材料中超声信号的激发和接收,其非接触的优势克服了常规超声检测中接触式换能器在高温、高压、腐蚀等恶劣环境下的应用限制,并且易于实现高分辨率的空间扫描,是一种极具前景的无损检测技术^[1-2]。同时,激光超声信号具有多模态、窄脉冲和宽频带的特点,时域分辨率高,频域覆盖范围广泛,有利于提高检测的精度和全面性。

受检测方式及材料结构的影响,激光超声检测过程往往伴随有大量噪声,尤其是高频随机噪声的存在严重影响了激光超声信号质量,进而制约了对缺陷和材料参数的检测能力。目前,针对激光超声信号去噪的研究较少。文献[3]将小波变换运用于激光超声信号的去噪处理之中,提取出试件中的直达纵波及其反射回波。但是,小波基函数的选取必须根据实际情况来确定^[4],因为激光超声信号的多模态特点使局部细节呈现多变特性,而不同的小波基具有不同的局部细节适应性,另外在整个分解过程中,小波基又必须是固定的,无法随局部细节变换而改变。

文献[5]提出了一种基于经验模态分解(EMD)的激光超声信号去噪方法,根据连续均方误差准则来分离信号与噪声主导模块,然后利用部分模态完成重构。EMD从原理上克服了小波变换不足,它不需要引入任何辅助函数和先验知识,而是从信号的局部特征出发,对其进行分解,在非平稳信号的自适应检测方面优势显著^[6]。但是该方法忽略了EMD在对宽带信号分解时同一级固有模态函数(IMF)上的信噪混叠现象,即不能通过IMF将信号和随机噪声完全分离,这种现象在激光超声信号分解过程中尤为明显,直接重构必然引入不必要的噪声。

针对由随机噪声引起的IMF信噪混叠问题,部分文献^[7-9]把研究重点放在EMD与小波结合

上,对IMF进行小波阈值再处理。从结果上看,该方法的确能起到一定的效果,但其思想却有违于采用EMD方法避免小波变换在基函数、分解层数及阈值选取的困难的初衷,不利于信号的自适应性检测。

本文研究了激光超声信号的EMD时间尺度滤波过程,分析了信噪不完全分离的成因,提出基于窗函数的重构信噪比改善方法以及基于峰度检验的时窗位置确定策略,在保证方法自适应性的前提下,实现了信噪混叠IMF的再去噪,并利用仿真和实验信号验证了该方法的可行性与改进效果。

2 经验模态分解算法

经验模态分解算法是一种具有自适应性的分解方法,相比Fourier变换和小波变换,它不需要基函数,而是直接从信号局部特征出发,得到一系列周期逐渐增大、中心频率逐渐降低的IMF。IMF必须满足如下条件^[10]:

(1)在整个时域上,该数据的极值点和过零点数目必须至多相差一个;

(2)在任一点,其上下包络线的均值始终为0。

该约束条件用以保证IMF的窄带特性,并避免其瞬时频率因波形不对称性而产生多余波动。

EMD步骤可概括如下^[11]:

(1)记原始信号为 $x(t)$,令 $r(t)=x(t)$;

(2)求取 $r(t)$ 极大值和极小值,并通过插值方式得到其上下包络 $u(t)$ 和 $v(t)$;

(3)计算上下包络均值: $m(t)=[u(t)+v(t)]/2$;

(4)计算信号与包络均值之差: $h(t)=r(t)-m(t)$;

(5)判断 $h(t)$ 是否满足了成为IMF的2个条件,若不满足,令 $r(t)=r(t)-h(t)$,并重复步骤(2)~(4),直到 $h(t)$ 满足IMF定义,或者达到了

一定的停止条件为止。此时,记 $IMF_1(t)=h(t)$;

(6) 令 $r(t)=r(t)-IMF_1(t)$, 重复(2)~

(5), 得到 IMF 序列 $IMF_{2\sim n}(t)$, 以及无法再分的残余项 $r(t)$, 从而宣告整个 EMD 分解过程结束。

信号 $x(t)$ 可以表示为 $IMF_1\sim IMF_n$ 及 $r(t)$ 的叠加:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i(t) + r(t). \quad (1)$$

3 基于 EMD 的信号去噪

3.1 时间尺度滤波

EMD 具有与小波变换类似的变尺度带通滤波特性, 能将信号分解为具有不同频段的子带信号。基于 EMD 方法的信号去噪重构主要为 2 种形式: 时间尺度滤波和阈值去噪。前者是对原始信号分解得到的各级 IMF 进行区分, 将被判定为噪声成分的前几级高阶 IMF 丢弃, 然后利用剩余 IMF 进行信号重构; 后者则是在不舍弃任何分量的情况下, 对高阶 IMF 进行阈值处理后重构。相比时间尺度去噪, 阈值法具有以下问题:

(1) 阈值的选择具有难度, 受信号局部特点影响较大, 不具有统一评判标准;

(2) 在足够细分时, 高阶信号接近纯噪声, 即使含有有用信号, 也更多的是与噪声具有时频相似性的部分, 阈值处理无法识别有用信号, 反而只会将噪声成分引入重构信号, 降低信噪比。

3.2 IMF 能量密度准则

文献[12]分析了白噪声在 EMD 下的能量密度分布规律, 近似满足 χ^2 分布, 即随着分解的进行, 分布在各阶 IMF 上采样点逐渐向低能量段集中, 噪声总能量将呈递减趋势。由于噪声频段一般较高, 当有用信号出现时, 往往会打破这种递减趋势, 产生一个局部的能量分布极小值点, 该极值点之后, 信号将替代噪声成为各级模态的能量主导。该准则把包括该极值点在内的前几阶 IMF 作为噪声分量排除, 而将下一阶 IMF 作为起点进行信号重构。

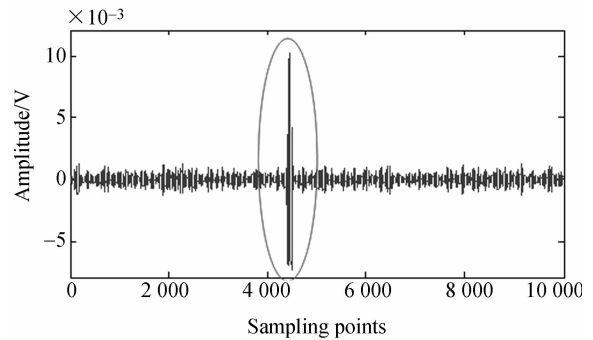
3.3 信噪混叠成因分析

分析激光超声信号时, 有用信号和噪声成分在同一级 IMF 上的混叠, 使 EMD 时间尺度滤波受到制约: 要么保留该 IMF, 同时也保留了噪声; 要么剔除该 IMF, 这又意味着有用信号的失真。

混叠成因既与 EMD 的算法本质有关, 又与被分析信号和噪声的频带特性有关。

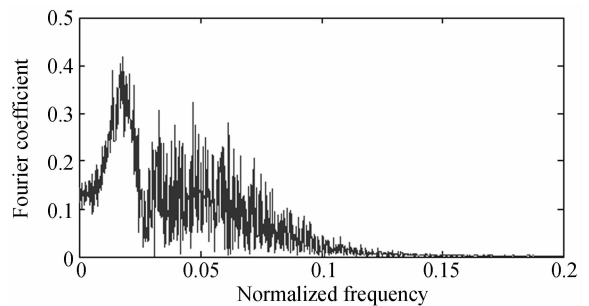
首先, IMF 的定义仅对分量的窄带振荡和对称性设置了约束条件, 却并未对模态的存在性进行约束^[13], 导致 EMD 算法并不具备间歇特性, 即分解得到的 IMF 往往呈现出横亘于整个时间轴上的振荡波形, 而并不关心该振荡分量是否存在。这种矛盾在对非平稳瞬态信号分解时尤为突出, 表现为在本该无信号的时间段内出现了异常抖动现象。

其次, 瞬态信号与白噪声都具有宽带特点, 造成有用信号与噪声频带的重叠, EMD 作为多分辨率带通滤波器组, 难以对相同或相近频段信号的分离, 而且会产生一些虚假频率, 影响信号质量。



(a) IMF4

(a) IMF4



(b) IMF4 频谱

(b) IMF4 frequency spectrum

图1 重构起点处的信噪混叠现象

Fig.1 Aliasing in the reconstruction start

信噪不完全分离现象在重构起点附近最为显著。以某一实测激光超声信号为例, 作为 EMD 重构起点的 IMF 如图 1 所示, (a) 为该 IMF 的时域波形, (b) 为相应归一化频谱。圈选部分为有

用信号成分,虽然有用信号能量已占主导,但噪声成分仍不可忽视,且很难从频域分离。

4 基于峰度检验的加窗方法

针对 EMD 方法在对瞬时信号分解重构效果上的缺陷,本文提出了基于时域窗函数的重构信噪比改善方案。总体思想是:通过窗函数将所关心的 IMF 上有用信号段保存,而抑制噪声幅值,之后再行信号重构。该方法的主要工作集中于两个方面:一是窗函数的选择,二是窗函数位置的确定。

4.1 窗函数选择

窗函数的选取原则除了保证最基本的通带保留和阻带截止功能外,还应考虑过渡带的平滑性,使原信号不会因加窗操作而产生奇异点。

本文采用 Turkey-Hanning 窗函数,其实质是矩形窗和升余弦窗的结合,表达式记为:

$$\omega(n) = \begin{cases} 0.5 \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{M+1}\right) \right], & 1 \leq n \leq \frac{M}{2} \\ 1, & \frac{M}{2} < n \leq \frac{M}{2} + l \\ 0.5 \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi(n-l)}{M+1}\right) \right], & \frac{M}{2} + l < n \leq M + l \end{cases}, \quad (2)$$

其中: l 为通带跨度, M 为过渡带宽度。图 2 给出了 Turkey-Hanning 窗函数时域模型,其中, $M=100, l=100$ 。

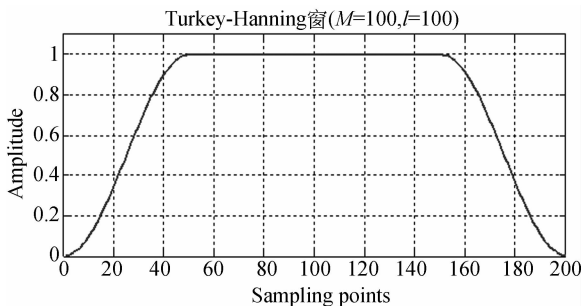


图 2 Turkey-Hanning 窗函数

Fig. 2 Turkey-Hanning window

4.2 加窗位置确定

时窗位置的确定需要对有用信号边界进行提取。Manuel 等^[14]针对心音信号(ECG)提出了一种加窗方式,主要是通过找到基准点两侧最近极

小值和过零点的方法来提取有用信号的位置和边界。但是,ECG 为周期性单峰信号,具有明显的重复性,而激光超声多模态的特点决定了其波形的复杂性。以表面波为例,波形成分包括掠面纵波、横波、Rayleigh 波等等,其往往呈现出多波峰特点,不规则且非周期,造成基准点的选取缺乏依据,困难较大。因此,该方法并不适用于激光超声信号。

通过观察激光超声信号 EMD 时域波形发现,在重构起点附近 IMF 中,有用信号与噪声成分具有不同的波动幅值:有用信号幅值较大,而其他区域则相对小很多。幅值较小的波动对应于 EMD 为保证对称震荡性原则所残留的噪声。这里正可以利用幅值的差异性来从时域上对有用信号和噪声进行分段。根据上述判断,本文提出了基于 IMF 序列局部峰度值统计特征的加窗位置确定方法。

这里,引入峰度的概念:

峰度^[14-16]又称峰态系数,是统计学常用的一项参数,表征概率密度分布曲线在平均值处峰值高低的特征数,用四阶中心距来测定,其公式为:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - x)^4 f_i}{ns^4}. \quad (3)$$

从概率分布来看,峰度反映了概率密度函数尾部的厚度,即分布形态的陡缓程度;直观来讲,就是描述了一组数据相对其均值的不规则抖动性。例如,正态分布随机信号的峰度值在 3 左右;对于一个正弦信号,其峰度值在 1.5 左右;而对于图 1 中 IMF4,由于有用信号与噪声成分之间振动的差异性,其峰度值高达 15.9。

鉴于实验中高频噪声多为随机噪声,且大多服从高斯分布,对纯噪声成分求峰度,其数值应在 3 左右,而当有用信号存在时,峰度将远高于该指标。考虑存在高斯混合噪声的情况,噪声峰度值会以 3 为中心小范围波动,可取一定的裕度,将阈值设置为 5,通过对被考察 IMF 局部求峰度,有效地辨别出有用信号与噪声的分界点。具体流程如下:

(1)将 IMF 在时域按长度 step 等分成 n 段,分别记为 x_1, x_2, \dots, x_n ,其中,step 应尽量小以获得更好的分辨率,但同时也要保留足够的长度以充分反映信号趋势。

- (2)初始化: $thr=5, x=x_1, i=1$;
- (3)计算 x 的峰度 fd_i ;
- (4)比较相邻峰度值与阈值 thr 的相对关系:
 - a. 若 $(fd_i - thr)(fd_{i-1} - thr) < 0$, 表示 x 从噪声区域进入了有用信号段(或从有用信号段离开), 将此时的采样点序号 $(i-1) * step$ 存入 index;
 - b. 若 $(fd_i - thr)(fd_{i-1} - thr) \geq 0$, 分界点并未到达, 直接转到步骤(5);
- (5) $i=i+1$, 判断分界点是已否出现:
 - a. 未出现, 则 x 取前 i 段序列, 记为 $x=x_1$;

x_i ;

b. 出现, 且设首个分界点出现在 x_{k+1} 段, 则将首块噪声区域 $x_1 : x_k$ 与 x_i 首尾相接形成新的 x , 记为 $x = (x_1 : x_k) \cup x_i$;

重复(3)~(5), 直至取到 IMF 末端停止。index 中元素即为信号与噪声分界点。

需要说明的是, 在步骤(4)b 中, 将首块噪声区域保存并用于后续峰度判断的目的, 一方面也是将其作为有用信号存在的参考项, 另一方面也是避免因个别数据段的局部差异性而引起误判。

以长度为 $9 * step$ 的数据段为例, 其流程可用图 3 直观表示。

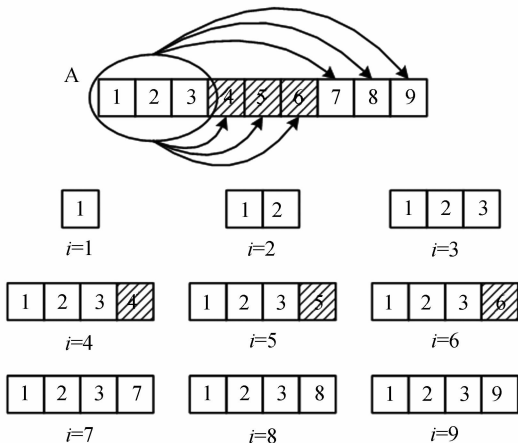


图 3 峰度检验流程示意

Fig. 3 Process of kurtosis test

图 3 中, 编号为 4~6 的数据段为有用信号, 其两侧为未被完全分离的噪声。从 $i=1$ 到 $i=9$, 各步所抽取数据段如图 3 中编号所示, 可见峰度检验项 $(fd_i - thr)(fd_{i-1} - thr)$ 在 $i=4$ 和 $i=7$ 时发生跳变, 则可确定 $3 * step$ 和 $6 * step$ 为有用

信号的起始点和结束点。

综上, 本文中利用 EMD 对激光超声信号去噪的改进流程可概括如下:

- (1)对原始含噪声信号进行经验模态分解, 得到 L 级 IMF;
- (2)利用 IMF 能量法确定重构起点 k ;
- (3)从重构起点开始, 对前两级分量 (IMF_k 、 IMF_{k+1}) 利用峰度检验确定有用信号边界;
- (4)对有用信号区间加载 Turkey-Hanning 窗, 得到信噪比增强后的 IMF'_k 、 IMF'_{k+1} ;
- (5)重构信号:

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=k}^{k+1} IMF'_i + \sum_{j=k+2}^L IMF_j \quad (4)$$

5 仿真信号分析

仿真信号为采用有限元方法得到的铝块试件激光超声表面波波波形 $x(t)$ 与高斯随机噪声序列 $n(t)$ 的叠加, 得到信噪比降低到 4.3 dB 的含噪声信号 $s(t) = x(t) + n(t)$, 对 $s(t)$ 进行 EMD 得到 12 级 IMF 分量, 部分波形显示如图 4。

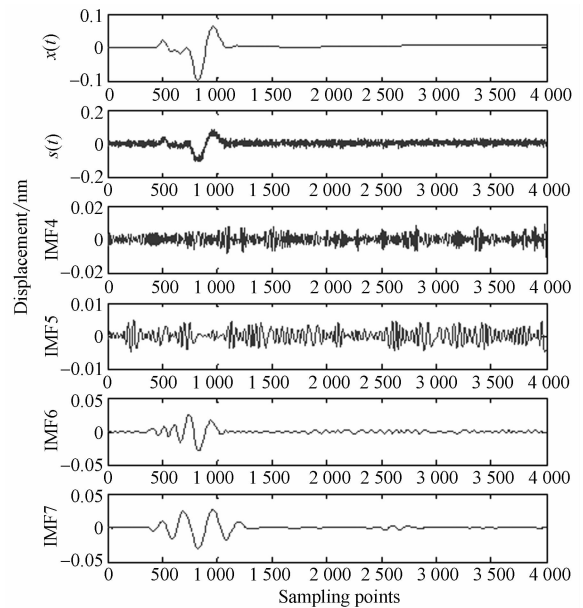


图 4 原始波形及其 EMD 分解结果

Fig. 4 Original wave and EMD results

各级 IMF 能量密度如图 5 所示, 从 IMF_1 至 IMF_5 能量密度呈递减趋势, 而从 IMF_6 开始回升。按照上文中判据, 将 IMF_6 作为去噪后信号

的重构起点。

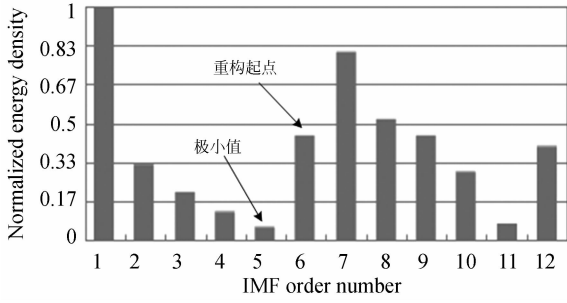


图 5 各级 IMF 能量密度分布

Fig. 5 Energy density distribution in each IMF

对 IMF₆、IMF₇ 利用峰度值判定信号边界,并用 Turkey-Hanning 窗处理。图 6 为 IMF₆ 加窗前后波形,IMF₇ 有类似结果。

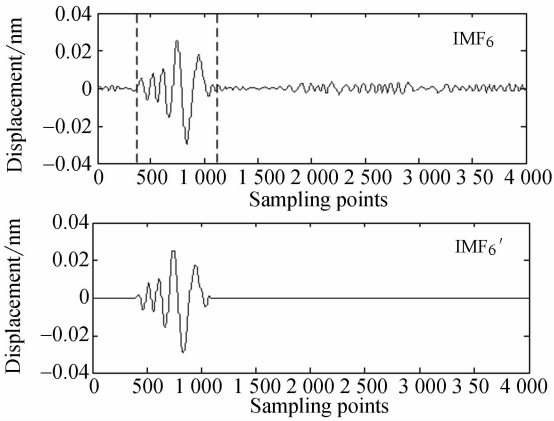


图 6 IMF6 加窗前后波形

Fig. 6 IMF6 waves before and after windowings

可见,该方法较好地识别出了有用信号与噪声成分的边界,能有效截止信号段以外噪声。最后,利用加窗增强后的 IMF₆'、IMF₇' 以及 IMF₈ ~ IMF₁₂ 重构信号 $\hat{x}(t)$, 引入信噪比(SNR)和相关系数(CC)作为降噪效果评判标准。

图 7 为有/无加窗操作的重构信号。在不加窗时,重构信号伴随明显抖动,而窗函数的加载在保存有用信号特征的同时,较好地抑制了噪声,并且把信噪比从不加窗函数时的 19.3 dB 提升到 22.7 dB,信噪改善比(SNIR)从 15 dB 提升到 18.4 dB。

表 1 列出了对不同输入信噪比情况下的原始信号去噪效果,其中,改善量表示加窗后信噪比和相关系数相对不加窗时的性能提升。

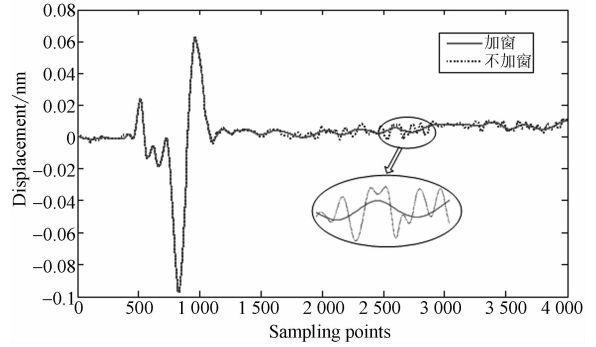


图 7 有/无加窗情况的重构信号比较

Fig. 7 Reconstruction signals with/without windowing

表 1 不同噪声水平下去噪效果对比

Tab. 1 Denoising effects in different noise levels

信噪比 / dB	原始信号	18.3	15.1	10.4	4.3	-1.7
不加窗	29.7	26.2	22.6	19.3	12.6	
加窗	32.5	29.6	25.7	22.7	16.1	
改善量	2.8	3.4	3.1	3.4	3.5	
相关系数	原始信号	0.992 6	0.984 3	0.957 4	0.852 3	0.626 8
不加窗	0.999 5	0.999 0	0.996 8	0.992 4	0.972 2	
加窗	0.999 7	0.999 6	0.998 5	0.996 0	0.982 6	
改善量	0.000 2	0.000 6	0.001 7	0.003 6	0.010 4	

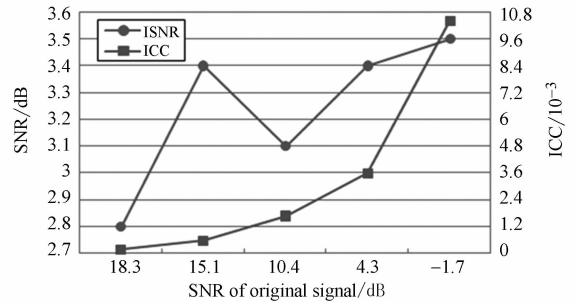


图 8 改进效果随信号质量下降的变化趋势 (ISNR 为信噪比改善, ICC 为相关系数改善)

Fig. 8 Improvement responding to signal quality decline (ISNR—improved SNR, ICC—improved CC)

将改进效果随信号质量下降的变化趋势作曲线如图 8。从表 1 和图 8 可见,不同信号质量时,基于峰度检验的窗函数法总体保持了 3 dB 左右的信噪比增强和 20% 的去噪性能改进,信噪改善比达 14 dB(对应原始信号 SNR=18.3 dB 时)以上。同时,信噪比和相关系数均有随着信号质量下降而改善效果愈发明显的趋势,反映了该方法在信号受噪声污染较严重情况下的适应性和优势。

6 实验研究

实验时,采用工作波长为 532 nm、脉冲上升时间为 10 ns、单脉冲能量最大可达 180 mJ 的 Nd:YAG 激光器。在铝块表面激发的超声信号,经由美国 IOS 公司 AIR-1550-TWM 型激光干涉仪接收,材料选用带缺陷铝试块。图 9 为实验系统照片。调整检测探头位置与脉冲激光照射点于试件的同侧,检测试件上激光超声表面波信号。

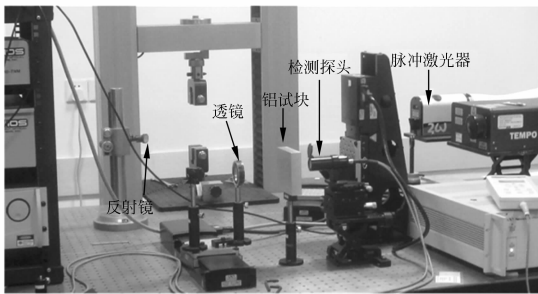


图 9 实验系统照片

Fig. 9 Photo of experimental system

图 10 对比了原始信号、常规 EMD 重构信号以及利用窗函数改善后的去噪信号,其中虚线框选部分为缺陷回波,右侧为该区域局部放大图。

对于信号中存在边界或缺陷回波的情况,由于信号的多模态及 EMD 的变尺度特性,每级 IMF 不一定包含所有信号成分,即某级 IMF 中可以仅包含直达波信号及混叠的噪声,而其下一级 IMF 却既含有直达波信号,又含有回波信号,不作任何处理的重构将使噪声与回波信号叠加。所以,抑制前几级 IMF 中有效信号段以外的噪声成分对提高回波信噪比同样有意义。

结果显示,本文方法对实测信号同样有效,不仅很好地抑制了信号段以外噪声成分,同时也改

进了回波质量,使波形更加平滑,自适应性强。

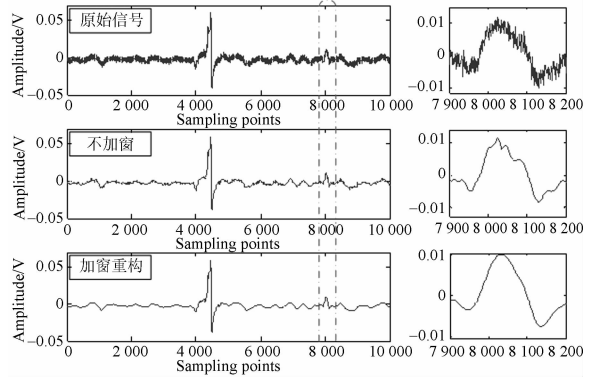


图 10 原始信号、不加窗重构信号与加窗重构信号比较

Fig. 10 Comparison among original signal and signals with and without windowings

7 结论

以激光超声信号为对象,提出了一种基于峰度检验策略的时域加窗方法,以克服基于 EMD 时间尺度去噪时有用信号与噪声不完全分离现象,提高信号去噪效果。通过计算重构起点附近 IMF 的局部峰度值并与阈值比较,判断有用信号位置和边界,然后借助 Turkey-Hanning 窗屏蔽信号段以外混叠的随机噪声,最后使用经窗函数处理过的 IMF 进行重构,达到改善重构信噪比的目的。利用有限元仿真信号进行方法验证和分析,并比较了不同信号质量下的去噪效果。结果显示,该方法去噪能力达 14 dB 以上,较原始方法信噪比提高 3 dB 左右,相对性能增强 20%,且改进效果随噪声水平的增加而上升,有利于低信噪比下的信号提取。最后,将该方法应用于检测实验中,提取了含缺陷铝试块上的激光超声表面波信号,具有良好的自适应性。

参考文献:

- [1] JIN Y, UME I C. Laser ultrasonic technique for evaluating solder bump defects in flip chip packages using modal and signal analysis methods [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2010, 57(4): 920-932.
- [2] 谭项林,潘孟春,罗诗途,等. 基于激光超声的材料力学性能测试方法研究[J]. *激光与红外*, 2011, 41(11):1183-1187.

- TAN X L, PAN M C, LUO S H T, *et al.*. Testing method for mechanical properties of materials based on laser-generated ultrasonic [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(11):1183-1187. (in Chinese)
- [3] 耿森林,尚志远,石焕文,等. 基于小波变换的激光超声信号处理[J]. *云南大学学报:自然科学版*, 2005, 27(1):44-46, 51.
- GENG S L, SHANG ZH Y, SHI H W. Laser ultrasound signal processing based on Wavelet Transform [J]. *Journal of Yunnan University: Natural*

- Sciences Edition*, 2005, 27(1):44-46, 51. (in Chinese)
- [4] 龚志强, 邹明玮, 高新全, 等. 基于非线性时间序列分析经验模态分解和小波分解异同性的研究[J]. 物理学报, 2005, 54(8):3947-3957.
GONG ZH Q, ZOU M W, GAO X Q, *et al.*. On the difference between empirical mode decomposition and wavelet decomposition in the nonlinear time series [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(8): 3947-3957. (in Chinese)
- [5] 孙伟峰, 彭玉华, 许建华. 基于 EMD 的激光超声信号去噪方法[J]. 山东大学学报: 工学版, 2008, 38(5):121-126.
SUN W F, PENG Y H, XU J H. A de-noising method for laser ultrasonic signal based on EMD [J]. *Journal of Shandong University: Engineering Science*, 2008, 38(5): 121-126. (in Chinese)
- [6] 李欣, 梅德庆, 陈子辰. 基于经验模态分解和希尔伯特-黄变换的精密孔镗削颤振特征提取[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6):1291-1297.
LI X, MEI D Q, CHEN Z C. Feature extraction of chatter for precision hole boring processing based on EMD and HHT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1291-1297. (in Chinese)
- [7] 刘玉梅, 袁文华, 彭雨. 基于小波 EMD 的柴油机油耗量测量信号去噪处理[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(2):516-521.
LIU Y M, YUAN W H, PENG Y. Denoising disposal of measurement signals of fuel consumption from diesel engine based on wavelet EMD method [J]. *Journal of Central South University: Natural Science*, 2012, 43(2): 516-521. (in Chinese)
- [8] 陈卫萍, 潘紫微. 基于经验模态分解的小波阈值滤波去噪[J]. 安徽工业大学学报: 自然科学版, 2010, 27(4):397-400.
CHEN W P, PAN Z W. Denoising of wavelet threshold filtering based on empirical mode decomposition [J]. *Journal of Anhui University of Technology: Natural Science*, 2010, 27(4): 397-400. (in Chinese)
- [9] 秦品乐, 林焰, 陈明. 基于平移不变小波阈值算法的经验模态分解方法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(12):2637-2641.
QIN P L, LIN Y, CHEN M. Empirical mode decomposition method based on wavelet with translation invariance algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(12):2637-2641.
- [10] HUANG N E, SHEN ZH, LON S R, *et al.*. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [C]. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 1998, 454: 903-995.
- [11] WU Z, HUANG N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method [J]. *Proceedings of Royal Society London A*, 2004, 460: 1597-1611.
- [12] 钱昌松, 刘代志, 刘志刚, 等. 基于递归高通滤波的经验模态分解及其在地震信号分析中的应用[J]. 地球物理学报, 2010, 53(5):1215-1225.
QIAN CH S, LIU D ZH, LIU ZH G, *et al.*. EMD based on recursive high-pass filter and its application on seismic signal analysis [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(5): 1215-1225.
- [13] MANUEL B V, WENG B W, KENNETH E B. ECG signal denoising and baseline wander correction based on the empirical mode decomposition [J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2008, 38: 1-13.
- [14] MILLIOZ F, MARTIN N. Circularity of the STFT and spectral kurtosis for time-frequency segmentation in Gaussian environment [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(2): 515-524.
- [15] 郭洁, 陈祥献, 黄海, 等. 基于峰度的电力变压器铁芯松动故障在线监测方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(11):2401-2407.
GUO J, CHEN X X, HUANG H, *et al.*. Application of kurtosis in on line detection of transformer iron core looseness [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(11): 2401-2407. (in Chinese)
- [16] 朱军华, 余岭. 基于时间序列分析与高阶统计矩的结构损伤检测[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(1):137-143.
ZHU H J, YU L. Damage detection based on time series analysis and higher statistical moments [J]. *Journal of Southeast University: Natural Sciences Edition*, 2012, 42(1): 137-143. (in Chinese)

作者简介:



罗玉昆(1988—),男,湖北枝江人,博士研究生,2010年、2012年于国防科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事激光超声无损检测方面的研究。E-mail: luoyukun4580@hotmail.com



罗飞路(1946—),男,湖南衡阳人,教授,博士生导师,1983年于清华大学获得博士学位,主要从事电磁无损检测技术及其相关理论的研究。E-mail: fluo@nudt.edu.cn



罗诗途(1978—),男,江西泰和人,博士,副教授,2005年于国防科技大学获得博士学位,主要从事无损检测方面的研究。E-mail: luoshitu@163.com



潘孟春(1963—),男,湖南汨罗人,教授,主要从事电磁无损检测技术、弱磁传感技术、数字化测试技术等方面的研究。E-mail: pmc_nudt@vip.163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)