

基于赛利斯模型和分数阶微分的兰姆波信号消噪*

陈晓^{1)2)†} 汪陈龙²⁾

1)(南京信息工程大学, 江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 南京 210044)

2)(南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044)

(2014年3月17日收到; 2014年4月15日收到修改稿)

为降低噪声对超声兰姆波检测信号的影响, 提高信噪比和增加特征提取的精度, 提出了一种赛利斯模型下分数阶微分方法用于超声兰姆波信号去噪. 该方法对含噪声的兰姆波信号幅值谱进行各阶分数微分, 用赛利斯分布作为待处幅值谱的模型, 提出了幅值谱分数阶微分最大值和过零点与微分阶数的拟合三次关系式, 建立了幅值谱特征参数的计算式来提取特征参数和重建原始信号的幅值谱, 并结合相位谱重构去噪后的兰姆波信号. 仿真结果表明, 该方法可以有效地提高兰姆波信号甚至微弱兰姆波信号的信噪比, 同时降低均方误差和平滑度. 实验结果显示, 与小波去噪和集合经验模态去噪方法相比, 该方法在没有信号先验知识的情况下, 可以更有效地去除兰姆波信号的噪声, 同时更好地保留主信号的细节特征. 因此, 本文提出的方法可以有效地去除兰姆波检测信号中混入的噪声.

关键词: 兰姆波, 分数阶微分, 赛利斯模型, 去噪

PACS: 43.60.+d, 43.60.-c, 43.35.+d

DOI: 10.7498/aps.63.184301

1 引言

随着材料科学和工业技术的迅速发展, 超声波检测技术在材料无损检测中发挥着极为重要的作用. 兰姆波作为超声无损检测中的一种常见导波形式, 与传统的无损检测技术相比具有传播距离远、检测范围大、快捷、高效等优点, 已经成为国内外无损检测领域的研究重点^[1-7]. 它是一种重要的无损检测手段^[8-10], 非常适于板材结构的大面积无损检测^[11-14].

在实际检测中, 兰姆波信号通常都伴有噪声干扰, 使得接收端的信号成分变得非常复杂, 直接影响无损检测结果的准确性. 因此需要既能去噪又能保留有用信号的方法. 目前常用的去噪方法有小波变换(wavelet transform, WT)去噪方法、经验模态(empirical mode decomposition, EMD)去噪方法、分形去噪方法以及神经网络去噪方法等. 早在20世纪, Abbate和Koay^[15]就利用WT改进

了超声波探伤技术, 通过不同中心频率和固定带宽的高斯通带滤波器分离信号的频谱, 有效地消除了超声信号中的噪声, 提高了检测淹没在噪声中缺陷特征的能力. 最初小波变换只是用来抑制白噪声, Pardo等^[16]则将其用于去除板材无损检测中的颗粒噪声, 发展出了两种非抽取小波变换, 极大地改善了超声波颗粒去噪的效果. Boudraa等^[17]提出了一种基于EMD分解的去噪方法, 将含噪信号分解成若干个本征模态函数, 经过筛选或阈值选择重建去噪后的信号. 然而EMD的最大缺点是容易产生模态混叠及不同的本征模态函数中存在相似的成分. 为此, Wu和Huang等^[18]提出了一种集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)的去噪方法, 通过添加有限的白噪声来评估噪声数据, 可以自动去除任何情况下的模态混叠现象. WT与EMD各有其优缺点, 前者比较适合信噪比较高的情况, 而后者去噪后的噪声干扰仍然比较大. 经过学者们的不断努力, 二

* 国家自然科学基金(批准号: 10904073)和江苏高校优势学科II期建设工程资助项目资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: chenxiao@nuist.edu.cn

者实现了联合去噪^[19]. 除此之外, Zhang^[20]发展出了一种新型的阈值神经网络用于自适应去噪, 通过建立两类软硬阈值函数, 可以得到最优的阈值, 提高非线性自适应滤波器的性能. 但是至今还没有一种有效的用于兰姆波去噪的方法.

为了提高兰姆波信号去噪的效果, 本文提出了一种基于赛利斯模型和分数阶微分 (Tsallis mode and fractional differential, TFD) 的兰姆波信号去噪方法. 利用仿真信号与实测信号进行测试, 并将其与小波去噪以及经验模态去噪方法对比. 实验结果表明, 该方法有效提高信噪比的同时降低均方误差和平滑度, 为应用兰姆波技术的准确测量奠定了基础.

2 方法

基于赛利斯模型和分数阶微分的兰姆波信号去噪方法主要有以下几个步骤: 对测量接收到的兰姆波信号幅值谱进行各阶分数阶微分; 然后用赛利斯分布作为待处理幅值谱的模型, 提取幅值谱特征参数; 最后结合相位谱重构去噪后兰姆波时域信号.

2.1 分数阶微分

分数阶微分理论几乎与整数阶微分理论同时诞生. 近年来, 国内外许多研究发现分数阶微积分算子具有记忆性和非周期性, 因此在物理^[21]、化学、自动控制^[22]、流体、金融^[23]、信号处理^[24,25]等领域的应用越来越广泛. 分数阶微分至今尚没有统一的定义. 本文采用 Samko 等^[26]提出的 Grunwald-Letnikov 分数阶微分的定义. 设测量接收到的兰姆波信号幅值谱为 $F(\omega)$, 则其分数阶微分定义如下:

$${}_c D_\omega^v F(\omega) = \lim_{h \rightarrow 0} \sum_{j=0}^{\lfloor \frac{\omega-c}{h} \rfloor} (-1)^j \binom{v}{j} F(\omega - jh), \quad (1)$$

其中, v 为微分阶数, ω 为角频率, $\binom{v}{j}$ 为二项式系数, h 为离散步长, c 为 ω 的初值, $\lfloor (\omega - c)/h \rfloor$ 为 $(\omega - c)/h$ 的整数部分. 展开成级数形式则 $F(\omega)$ 分数阶微分 $y(v)$ 为

$$y(v) = \frac{1}{h^v} \sum_{j=0}^{\lfloor \frac{\omega-c}{h} \rfloor} b_j^v F(\omega - jh), \quad (2)$$

其中

$$b_j^v = \begin{cases} 1, & j = 0 \\ (-1)^j \frac{v(v-1)(v-2)\cdots(v-j+1)}{j!} & j > 0 \end{cases},$$

j 为循环变量.

2.2 幅值谱特征参数提取

为了在频域求出未知的原始兰姆波幅值谱, 采用赛利斯分布作为模型. 赛利斯模型是运用非广延最大熵^[27]原理推导得出的一种分布, 它的表达式为^[28]

$$F(\omega) = A \left[1 + \frac{q-1}{3-q} \frac{(\omega - \mu)^2}{\sigma^2} \right]^{\frac{1}{1-q}} \quad (1 < q < 3), \quad (3)$$

其中 q 为非广延参数, μ 为赛利斯模型的中心频率, σ 为峰宽, A 为峰值. 当调节 q 的值时可以得到不同形状的峰, 比固定参数模型在应用上更加灵活, 准确率更高.

赛利斯模型的分数阶微分随微分阶数而变换. 设参数 $A = 5, \mu = 3, \sigma = 0.15, q = 1.5$, 图 1 所示为微分阶数在 0 到 1 之间变化时赛利斯模型各阶分数微分函数. 从图中可以看出, 赛利斯模型的最大值和过零点随微分阶数而变换. 如果能建立最大值和过零点与微分阶数之间的关系式, 就可以计算出它的特征参数. 图 2 给出了过零点和最大值与其微分阶数间的变化. 从图 2 中可以看出, 赛利斯模型的最大值和过零点都会随着微分阶数的变化而变化. 相比整数阶微分, 分数阶微分在阶数间增加了大量的中间数据, 因此可以为进一步分析提供更多的数据.

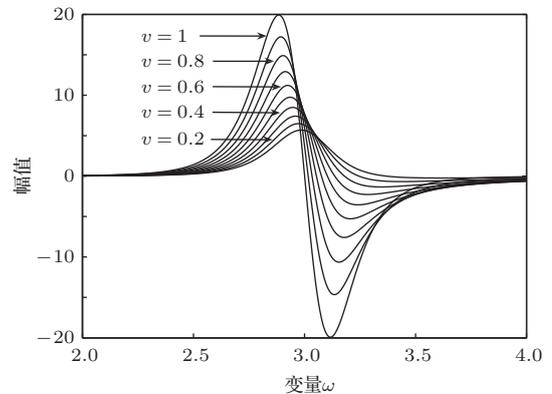


图 1 赛利斯模型的分数阶微分

当微分阶数在 0 到 1 之间变化时, 由图 2 可知

赛利斯模型的最大值 F_{\max} 和过零点 F_0 与微分阶数之间并非简单的线性关系. 经过对赛利斯模型的数值分析, 选用三次多项式来拟合最大值和过零点与微分阶数之间的关系能得到理想结果, 其表达式为

$$\begin{aligned} F_{\max}(v) &= d_3v^3 + d_2v^2 + d_1v + d_0, \\ F_0(v) &= c_3v^3 + c_2v^2 + c_1v + c_0, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 c_3, c_2, c_1, c_0 为过零点与微分阶数的三次多项式拟合系数, d_3, d_2, d_1, d_0 为最大值与微分阶数的三次多项式拟合系数, 利用最小二乘法可以得到这些系数的值. 图2给出了拟合曲线和数据点之间的对比曲线, 可以看出, 三次多项式可以很好地描述最大值和过零点随微分阶数的变化情况.

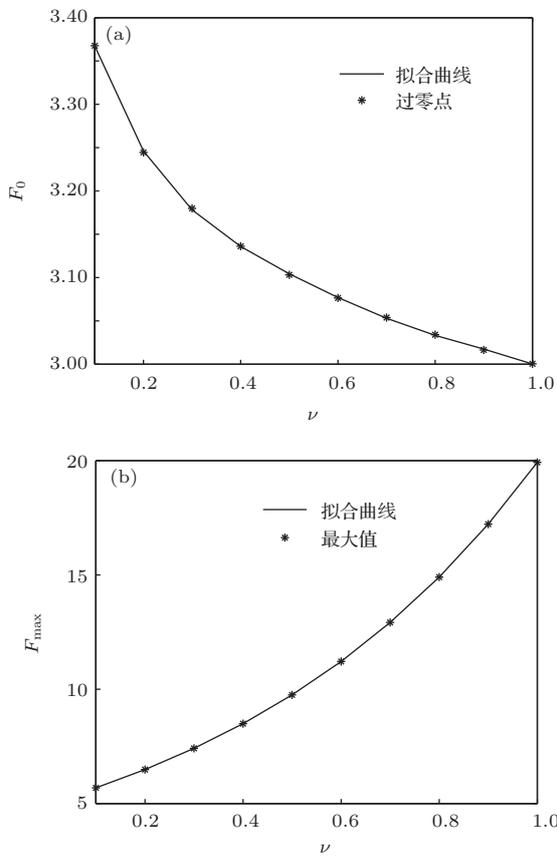


图2 赛利斯模型 (a) 过零点与其微分阶数的关系; (b) 最大值与其微分阶数的关系

据此, 结合 (3) 式, 推导出参数 A, μ 及 σ 的表达式为

$$\begin{cases} \mu = c_3 + c_2 + c_1 + c_0 \\ \sigma = \frac{2d_0 \left(\frac{2q}{q+1} \right)^{\frac{q}{1-q}}}{(d_3 + d_2 + d_1 + d_0) \sqrt{3 + 2q - q^2}} \\ A = d_0 \end{cases} \quad (5)$$

2.3 信号重构

首先对含噪声的超声兰姆波信号进行傅里叶变换, 得到其幅值谱和相位谱. 将幅值谱进行各阶分数微分, 用数值方法求取各阶分数微分的最大值以及过零点. 选用三次多项式分别对极值和过零点与微分阶数的关系进行拟合, 得到过零点与微分阶数的三次多项式拟合系数 d_3, d_2, d_1, d_0 和最大值与微分阶数的三次多项式拟合系数 c_3, c_2, c_1, c_0 . 由 (5) 式计算频域特征参数得到 A, μ 及 σ 的值. 根据 (3) 式的赛利斯模型重建频域幅值谱, 得到去噪后的幅值谱. 最后结合信号的相位信息, 重构去噪后的兰姆波时域波形.

3 仿真测试

为了验证本文提出的方法对超声兰姆波的去噪效果, 本节采用高斯调制的兰姆波信号 [29] 作为去噪的对象进行测试. 在实际测量中, 白噪声是最常见的噪声类型, 所以仿真测试中用白噪声作为噪声模型. 采用仿真信号可以计算出去噪后的信噪比, 能进行定量的比较. 设仿真信号中心频率为 2 MHz, 有效带宽为 100 kHz, 时域波形如图3所示. 同时对比研究了 WT 去噪和 EEMD 分解方法去噪的效果, 其中 WT 方法去噪时选取 sym8 小波, 分解层数为 4.

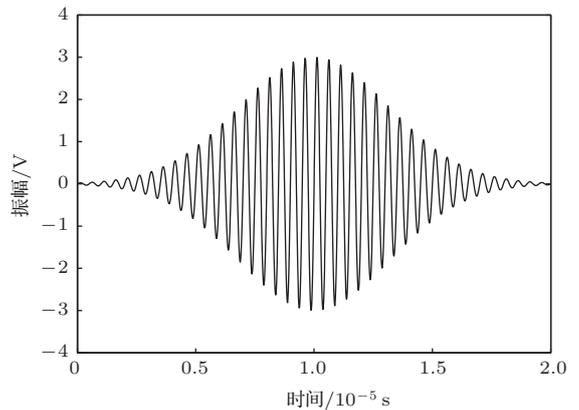


图3 原始信号时域波形

3.1 高斯白噪声

图4(a)为原始信号添加了高斯白噪声的时域波形, 信噪比为 5 dB. 对比三种不同方法的去噪效果, 图4(b)为采用 EMD 方法去噪后的信号, 去噪明显, 但是在原始信号为零的地方仍然存在噪声干扰; 采用 WT 方法去噪后的信号如

图4(c)所示,相比于EMD,去噪后的噪声干扰小,效果好,但是主脉冲部分存在毛刺现象,信号不光滑;图4(d)为采用本文所提出的TFD方法去噪后的信号,结果显示该方法去除了大部分的噪声干扰并且没有任何毛刺现象,相比于前两种去噪方法,有最好的去噪效果.

为了更好地验证TFD方法的去噪效果,将其应用于微弱兰姆波信号去噪,同样对比研究了WT去噪和EMD分解方法去噪.图5(a)为原始信号添加了高斯白噪声的微弱信号,其信噪比为-5 dB.由于噪声的强烈干扰,在使用EMD去噪之前,首先利用EEMD对信号进行预处理消除模态混叠现象,去噪后的信号如图5(b)所示.结果显示EMD可以去除部分的噪声干扰,但是在初始信号接近零的地方仍然存在大量噪声并且部分主脉冲失真严重.图5(c)为采用sym8小波、固定式阈值WT去噪后的信号,去噪结果明显优于EMD方法去噪,但是仍然存在主脉冲失真现象.图5(d)为采用TFD方法去噪后的波形,相比于前两种去噪方法,该方法有效去除了大部分的噪声干扰并且主脉冲部分与原始信号符合,克服了失真现象.

3.2 性能参数定量评价

由于原始信号已知,所以可以定量研究去噪的效果.本文依据信噪比(signal to noise ratio, SNR)、均方误差(mean square error, MSE)以及平滑度(r)三个性能评价参数来定量评价三种不同方法对于超声兰姆波信号的去噪效果.

为了验证对不同初始信噪比的去噪性能,对图3所示原始兰姆波信号添加了不同幅度的高斯白噪声,用三种方法分别对添加噪声后的信号进行处理并计算上述评价参数.表1—3分别给出了初始信噪比为10 dB, 5 dB以及-5 dB时三种去噪方法的性能评价参数.相比于EMD和WT方法去噪,本文提出的方法可以有效提高信噪比、降低均方误差和平滑度.

3.3 其他噪声

高斯白噪声只是白噪声的一种,除此之外还有泊松白噪声、瑞利白噪声等类型.为了验证TFD去噪方法的实用性,分别用泊松白噪声、瑞利白噪声作为噪声进行了仿真测试.图6(a)为原始信号添加了泊松白噪声的时域波形,信噪比为5 dB.图6(b)为采用TFD方法去噪后的波形,结果显示

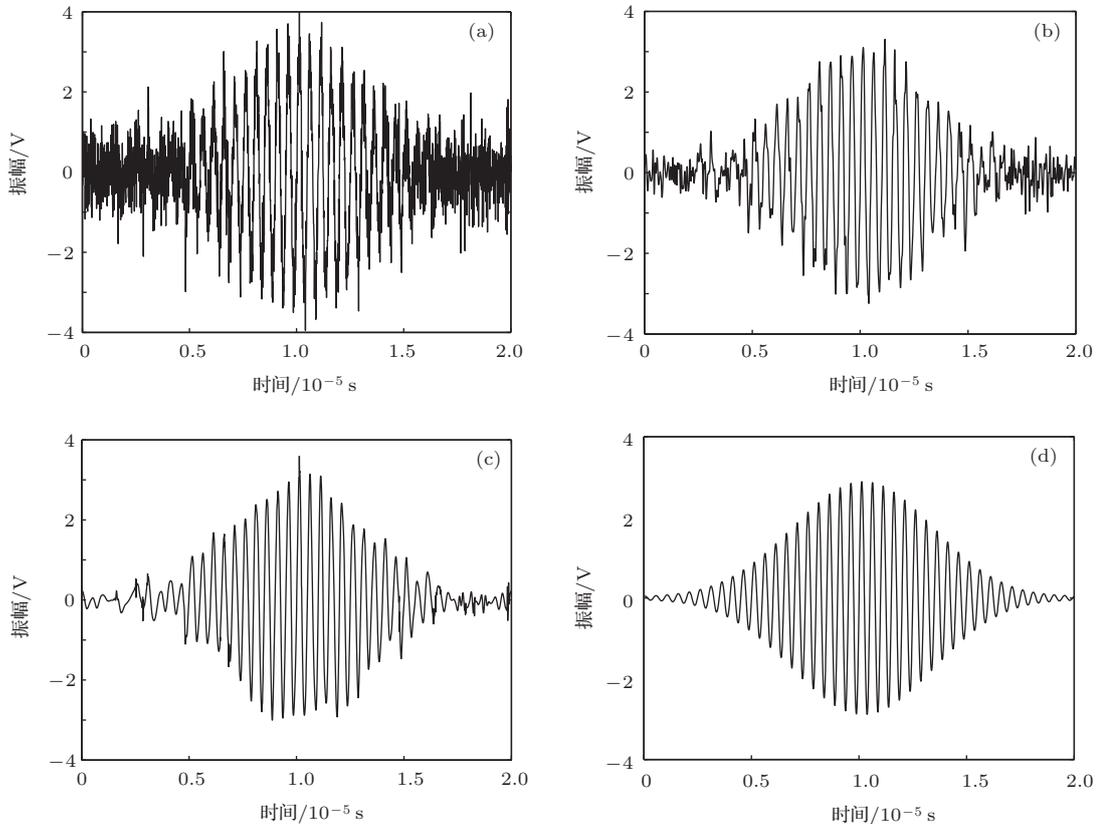


图4 时域波形 (a) 含噪信号; (b) EMD去噪; (c) WT去噪; (d) TFD去噪

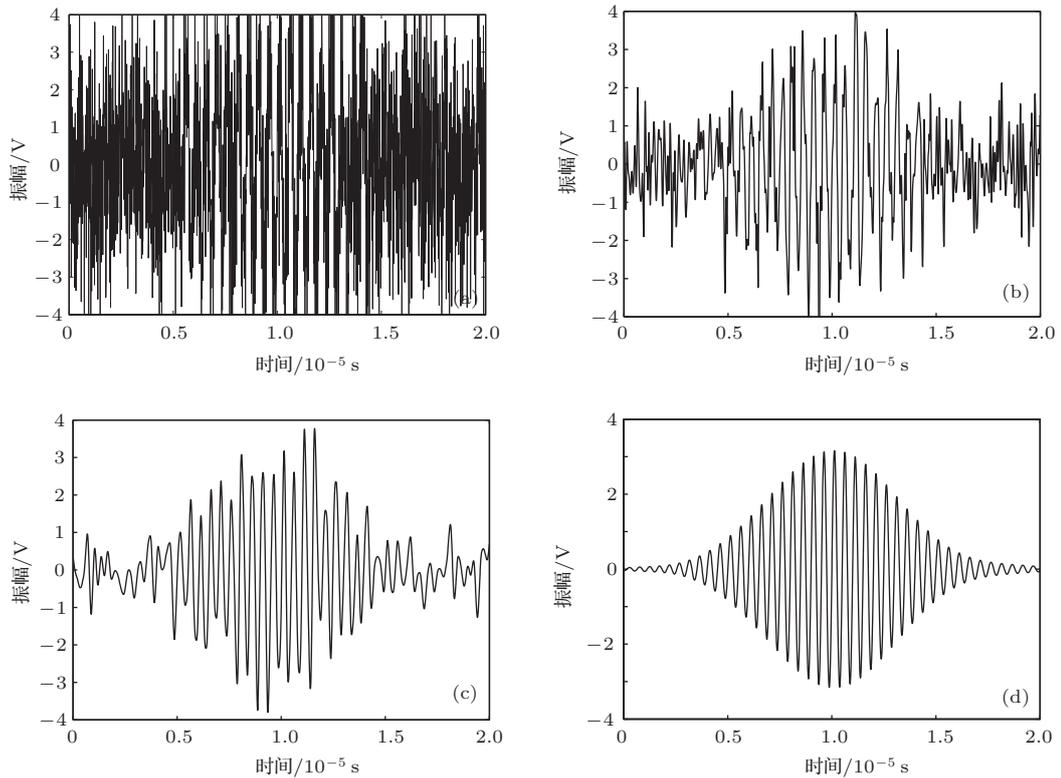


图5 时域波形 (a) 含噪信号; (b) EMD去噪; (c) WT去噪; (d) TFD去噪

表1 初始信噪比为 10 dB

参数	EMD	WT	TFD
SNR/dB	17.5107	20.8518	30.8478
MSE/dB	-16.4784	-19.8194	-29.8154
r	1.1740	1.0482	1.0166

表2 初始信噪比为 5 dB

参数	EMD	WT	TFD
SNR/dB	12.3316	16.0361	25.7759
MSE/dB	-11.2992	-15.0037	-25.7435
r	1.6187	1.4487	1.0343

表3 初始信噪比为 -5 dB

参数	EMD	WT	TFD
SNR/dB	3.5565	7.1403	14.5280
MSE/dB	-2.5241	-6.1079	-16.4956
r	3.8084	1.2427	1.0602

主脉冲部分与原始信号一致, 不存在失真和毛刺现象. 图6(c)则为原始信号添加了瑞利白噪声的时域波形, 信噪比为5 dB. 图6(d)为采用TFD方法去噪后的波形, 整个信号同样较好地还原了原始信

号的特征. 由此可知, TFD方法不仅适用于高斯白噪声, 同样适用于消除泊松白噪声、瑞利白噪声等其他白噪声.

4 实验测试

为了验证TFD方法对于超声兰姆波检测信号的去噪效果, 将其应用于实测信号的去噪. 选择3.5 cm处的采集信号为原始信号, 其中心频率为420 kHz, 激励信号循环次数为25, 时域波形如图7(a)所示. 在实际测量过程中, 兰姆波信号受到测量系统多方面的干扰, 比如检测装置、实验环境引入的噪声等, 其整体表现为白噪声信号. 另外, 由于使用压电换能器激励和接收兰姆波信号, 压电换能器的旁瓣效应也会影响主脉冲的形状和特性. 因此测量得到的兰姆波噪声主要由以上两部分组成. 对测量得到的含噪声兰姆波信号, 选取sym8小波, 分解层数为4层的WT去噪后的信号如图7(b)所示, 该方法可以去除大部分的噪声干扰, 但是在初始信号为零的地方存在毛刺, 信号不光滑. 对于采集到的兰姆波信号, 当使用EMD去噪时容易产生模态混叠现象, 因此本节采用EEMD, 去噪后的信号如图7(c)所示, 相比于WT方法, 去噪不彻底,

在初始信号为零的地方干扰尤为严重. 图7(d)为采用TFD方法去噪后的信号, 结果显示该方法可

以去除绝大部分的噪声干扰, 不存在失真和毛刺现象, 去噪效果非常理想.

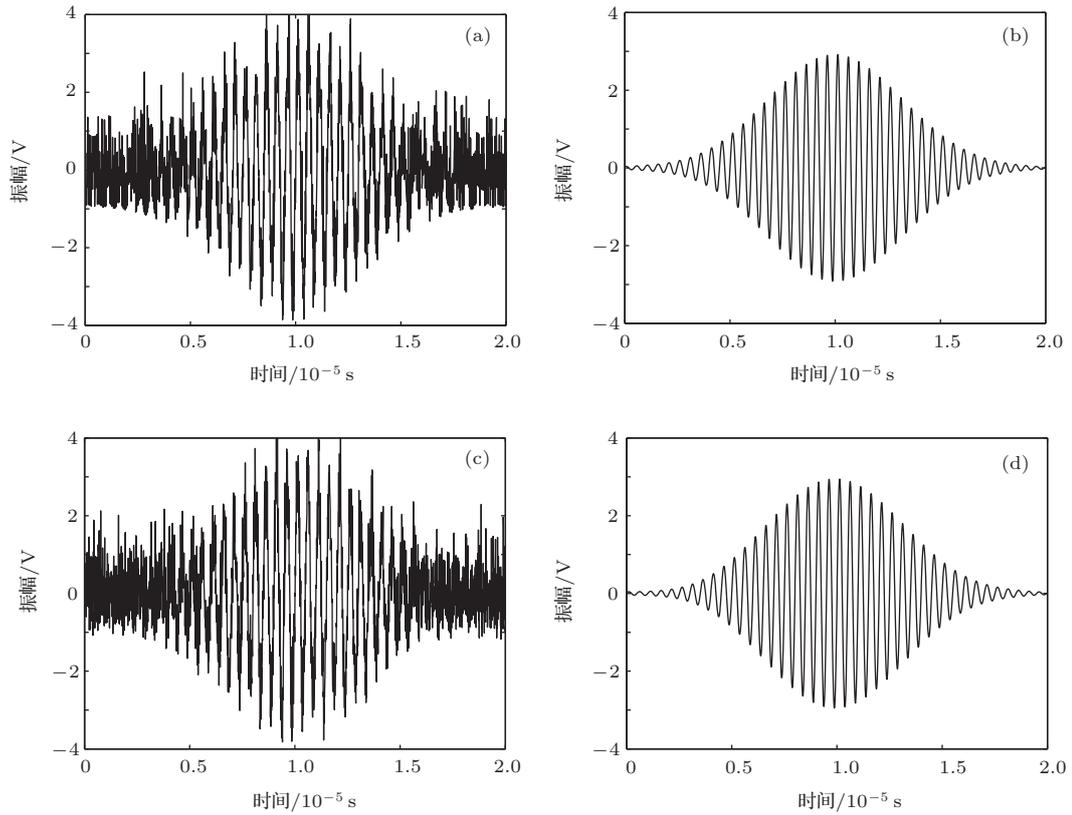


图6 时域波形 (a) 含泊松白噪声信号; (b) TFD去噪; (c) 含瑞利白噪声信号; (d) TFD去噪

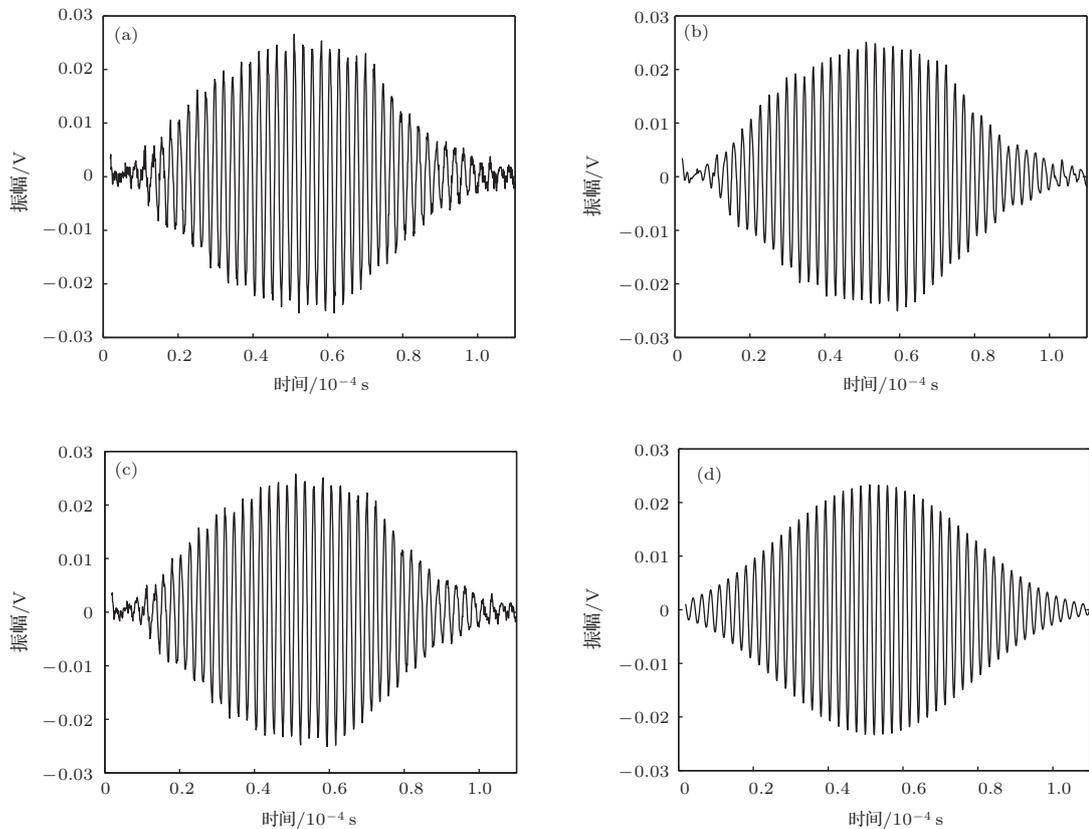


图7 兰姆波信号 (a) 原始信号; (b) WT去噪; (c) EEMD去噪; (d) TFD去噪

由于实验采集到的信号含有噪声干扰,无法计算去噪后的性能评价参数.为了更好地评价各种方法的去噪效果,对去噪前后的信号进行幅值谱分析.原始含噪信号的幅值谱如图8(a)所示.图8(b)和(c)分别为采用WT和EEMD方法去噪后的幅值谱,由于实验采集到的信号含有较

低的白噪声干扰,去噪效果都不理想.图8(d)为采用TFD去噪后的幅值谱,主脉冲与原始信号几乎一致,去除了大部分的干扰噪声,没有多余的细小突起部分,整个信号较好地还原了原始主信号的特征.与其他方法相比,有最好的去噪效果.

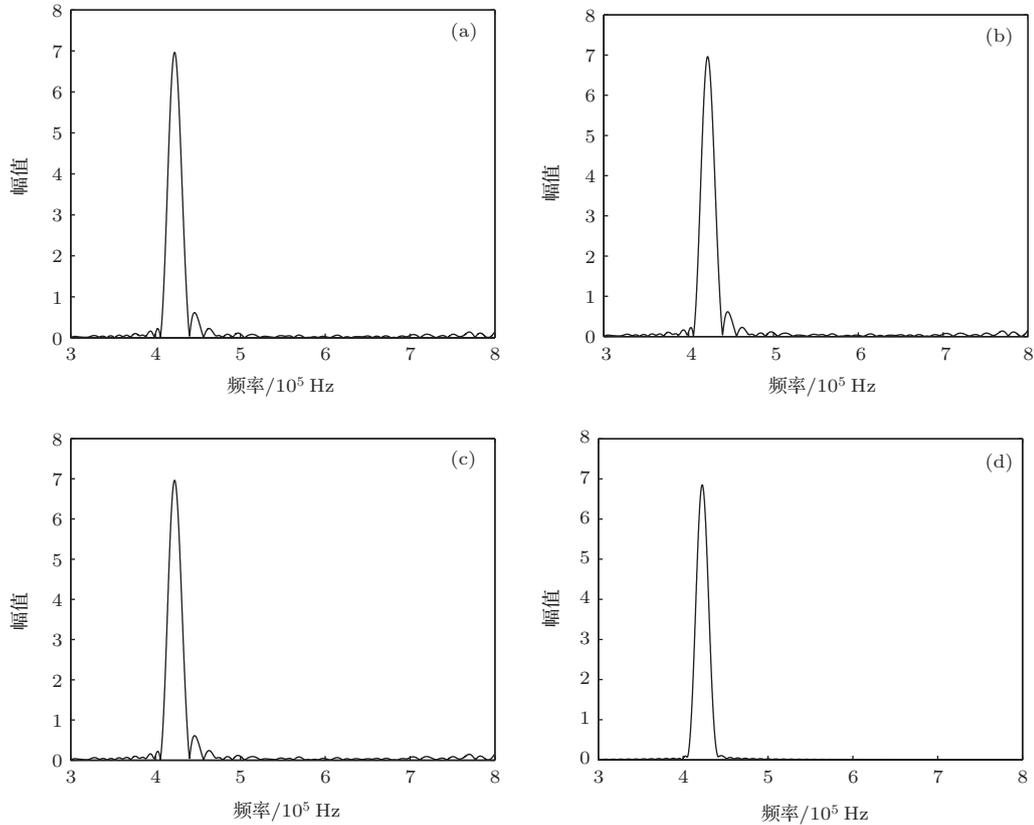


图8 幅值谱 (a) 原始信号; (b) WT 去噪; (c) EEMD 去噪; (d) TFD 去噪

5 结 论

迄今为止,对兰姆波检测信号的去噪处理方法大都基于小波去噪和经验模态去噪,而现实中的噪声干扰成分非常复杂,这些传统的方法都不能有效地去除干扰,尤其是微弱兰姆波信号. TFD 是本文提出的一种全新的处理方法,通过仿真与实验测试进行了去噪性能分析和评价.研究表明:该方法有效地提高信噪比的同时降低均方误差和平滑度,因为在去噪的过程中根据赛利斯模型能够准确地恢复原始信号的波形.在实际的工业应用中,TFD能有效去除噪声干扰,提高信噪比,突出主信号成分,对提高无损检测结果的可靠性和准确性具有重要的意义.

参考文献

- [1] Hong K, Yuan L, Shen Z H, Ni X W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104303 (in Chinese) [洪轲, 袁玲, 沈中华, 倪晓武 2011 物理学报 **60** 104303]
- [2] Pavlopoulou S, Soutis C, Manson G 2012 *Plastics, Rubber Compos.* **41** 61
- [3] Zhang H Y, Cao Y P, Yu J B, Chen X H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 114301 (in Chinese) [张海燕, 曹亚萍, 于建波, 陈先华 2011 物理学报 **60** 114301]
- [4] Ding H X, Shen Z H, Li J, Zhu X F, Ni X W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 196301 (in Chinese) [丁红星, 沈中华, 李加, 祝雪丰, 倪晓武 2012 物理学报 **61** 196301]
- [5] Zhang H Y, Yu J B 2011 *Chin. Phys. B* **20** 094301
- [6] Deng M X, Xiang Y X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 115202
- [7] Zhang H Y, Yao J C, Ma S W 2014 *Chin. Phys. Lett.* **31** 034301
- [8] Beard M D, Lowe M J S 2003 *Rock Mech. Mining Sci.* **40** 527
- [9] Laguerre L, Treysede F 2011 *Eur. J. Environ. Civil Eng.* **15** 487

- [10] Prado V T, Higuiri R T 2013 *NDT&E International* **59** 86
- [11] Cawley P, Lowe M J S, Alleyne D N, Pavlakovic B N, Wilcox P 2003 *Mater. Eval.* **61** 66
- [12] Chen X, Wan M 2005 *Ultrasonics* **43** 357
- [13] Lu Y, Ye L 2009 *J. Compos. Mater.* **43** 26
- [14] Liu Z Q, Zhang H Y, Ma X S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2492 (in Chinese) [刘镇清, 张海燕, 马小松 2003 物理学报 **52** 2492]
- [15] Abbate A, Koay J 1997 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.* **44** 14
- [16] Pardo E, Emeterio J, Rodriguez M, Ramos A 2006 *Ultrasonics* **44** 1063
- [17] Boudraa A O, Cexus J C, Saidi Z 2004 *Int. J. Signal Process.* **1** 1
- [18] Wu Z H, Huang N E 2009 *Adv. Adapt. Data Anal.* **1** 1
- [19] Chen X, Li J 2013 *J. Vibroengineer.* **15** 1157
- [20] Zhang X P 2001 *IEEE Trans. Neural Networks* **12** 567
- [21] Zhang Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 164501 (in Chinese) [张毅 2013 物理学报 **62** 164501]
- [22] Hu J B, Zhao L D 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 240504 (in Chinese) [胡建兵, 赵灵冬 2013 物理学报 **62** 240504]
- [23] Xin B G, Chen T, Liu Y Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 048901 (in Chinese) [辛宝贵, 陈通, 刘艳芹 2011 物理学报 **60** 048901]
- [24] Podlubny I 1999 *IEEE Trans. Automatic Control* **44** 208
- [25] Pu Y F, Wang W X 2008 *Sci. China F: Inform. Sci.* **51** 1319
- [26] Samko S C, Kilbas A A, Marichev D I 1993 *Fractional Integrals and Derivatives: Theory and Applications* (Switzerland: Cordon and Breach Science Publishers) p21
- [27] Tsallis C 1988 *J. Statist. Phys.* **52** 479
- [28] Li Y L, Yu S L 2007 *Sci. China B: Chemistry* **50** 797
- [29] Xu B, Giurgiutiu V, Yu L 2009 *SPIE* **7292** 72920I

Noise suppression for Lamb wave signals by Tsallis mode and fractional-order differential*

Chen Xiao^{1)2)†} Wang Chen-Long²⁾

1) (*Jiangsu Key Laboratory of Meteorological observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*)

2) (*School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*)

(Received 17 March 2014; revised manuscript received 15 April 2014)

Abstract

To suppress the noise and increase the accuracy of feature extraction for ultrasonic Lamb wave signals, we present a new method based on the Tsallis mode and the fractional-order differential in this paper. Firstly, the fractional-order differentials of the amplitude spectrum of the noisy Lamb signal at different orders are obtained by using the fractional differential theory. Then, the cubic polynomial between the peak amplitude and the derivative order, and that between the peak frequency and the derivative order are proposed based on the Tsallis mode. The characteristic parameters of the amplitude spectrum are extracted with the developed equations. Finally, the Lamb signal without the noise is restored by combining the amplitude spectrum with the phase spectrum. Simulated and experimental results show that the proposed method can improve the performance parameters such as mean square error, r , and signal-to-noise ratio. Consequently, the new method based on the Tsallis mode and the fractional-order differential has the effective noise suppression performance for Lamb wave signals.

Keywords: Lamb wave, fractional-order differential, Tsallis mode, noise suppression

PACS: 43.60.+d, 43.60.-c, 43.35.+d

DOI: [10.7498/aps.63.184301](https://doi.org/10.7498/aps.63.184301)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10904073) and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions.

† Corresponding author. E-mail: chenxiao@nuist.edu.cn