

doi: 10.3788/lop47.040702

一种基于光电探测的中子裂变信号去噪处理新方法

金晶¹ 魏彪¹ 冯鹏¹ 唐跃林¹ 任勇² 米德伶¹

(¹重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)
²重庆大学通信工程学院, 重庆 400044)

摘要 将经验模态分解方法应用于光电探测的裂变中子事件的分析与处理中,通过引入基于二次平滑度检测的自适应的分量处理机制和基于小波阈值技术的分量去噪方法,构建了一种基于光电探测的中子裂变事件信号去噪处理新方法。模拟实验和实测数据的分析结果研究表明,在同条件下,此方法适应性好,通过去噪处理后,信号的信噪比高,且信号的平滑度也较好,避免了因采取过度的去噪处理而将一些有用信息损失掉的不足。同时,去噪程度指标可进行量化设置。

关键词 信号处理; 去噪方法; 经验模态分解; 裂变中子信号

中图分类号 TL375.1 OCIS 070.2025 070.2615 文献标识码 A

A Novel De-Noiseing Algorithm of Fission Neutrons Signals by Photoelectric Detection

Jin Jing¹ Wei Biao¹ Feng Peng¹ Tang Yuelin¹ Ren Yong² Mi Deling¹

(¹Key Laboratory of Opto-Electronics Technology & System, Ministry of Education, Department of Opto-Electronics Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)
²College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract The empirical mode decomposition (EMD) is applied to analysis and processing of the fission neutrons events based on photoelectric detection. A new model on the de-noise of fission neutrons signals is established with self-adapting double-smoothness-detecting (DSD) algorithm on intrinsic mode function (IMF), and wavelet threshold filter. With the simulated and survey data, a series of comparisons with other signal de-noise methods are made. On an equal footing, the EMD-based-DSD has a better adaptability on various fission neutrons signals. The signal-to-noise ratio of the treated signal is higher while the waveform is more even. The loss of useful information caused by over-de-noise is avoided. Moreover, the de-noise degree can be customized quantifiably.

Key words signal processing; de-noising algorithm; empirical mode decomposition; fission neutrons signals

1 引言

光电探测技术是获取核随机信号的重要环节,基于它可对核信息系统输出的核随机信号进行信号分析与处理。它既是核科学技术中的重要研究领域,又是进行核信息系统内部特征和规律研究的重要保证^[1]。然而,经由光电探测系统所获取的核随机信号,往往含有大量的噪声,致使一些有价值的弱信号被淹没。如何从含有噪声的核信号中提取有用的信号,则是基于光电探测的核信号分析与处理所要解决的首要问题。

本文涉及的针对 ²⁵²Cf 自发裂变中子源所构造的光电探测信息处理系统,其作用是获取受激核材料中

收稿日期: 2009-04-15; 收到修改稿日期: 2009-07-09

基金项目: 国家军工预研专项基金(JW20*25067)和重庆市自然科学基金(CSTC2009BB2188)资助课题。

作者简介: 金晶(1982—),男,博士研究生,主要从事信号特征提取与识别等方面的研究。E-mail: jinjing@yeah.net

导师简介: 魏彪(1963—),男,博士,教授,主要从事核探测与核成像技术方面的研究。E-mail: weibiao@cqu.edu.cn

子裂变事件的信号以进行进一步处理,以便提取中子裂变事件的信号特征。裂变中子信号首先由快闪烁晶体(如 ${}^6\text{Li}$ 闪烁体)转换为光子信号,之后再由光电器件如光电倍增管(PMT)等转换为电信号。由于核材料裂变放射出快中子的过程会伴随着 γ 射线,这些伴随产生的 γ 射线由于核材料及反应装置的影响,会产生直穿 γ 射线、散射 γ 射线等干扰信号,同时由快闪烁晶体转换为光子信号,这对系统内所携带的中子裂变事件进行测量与分析会造成噪声影响,因此必须进行去噪处理。

信号去噪目前已有的很多方法^[2]不能够根据信号本身自适应的调整分解基以达到最佳的效果,并受Heisenberg不确定性原理限制、时域分辨率和频域分辨率相互制约。1998年,Norden E. Huang等提出Hilbert-Huang变换(HHT)方法,以瞬时频率为基本量,以固有模态信号为基本信号,非常适用于非平稳信号的处理。然而,目前基于HHT的信号去噪处理方法较为粗糙,将导致相应分量上有用信号的损失,使信号严重失真^[3]。本文寻求一种既能更好地反映裂变中子及 γ 射线的时频特性,又能依照给定的标准评价去噪环节中涉及的分量,并对不同分量做出不同的处置决策的新信号去噪方法,以便有效消除光电探测器受直穿 γ 射线、散射 γ 射线等噪声对探测中子裂变事件信号所产生的不利影响。

2 中子裂变事件信号的去噪原理与方法

2.1 中子裂变事件信号的经验模态分解

纳秒级光电核信息系统中的核计数(counts)信号,是非平稳的时变信号^[4-6]。核系统发生链式反应时,将迅速产生一系列裂变中子及 γ 射线,这一过程会造成核信号中的一系列突变点,在反应时间点附近,将产生随时间快速变化的各种频率的暂态分量。 γ 射线信号等干扰成分同样具有上述特点,包含较为复杂的频率成分,很难通过常规方法去除。由于含噪声的裂变中子信号在局部位置出现多种频率成分,所以完全的时域分析或频域分析都不能精确描述频率随时间的变化,难以真正估计信号的瞬时频率,无法反映信号的时频局部特征,这些特征正好是非平稳信号最根本和最关键的部分^[7]。

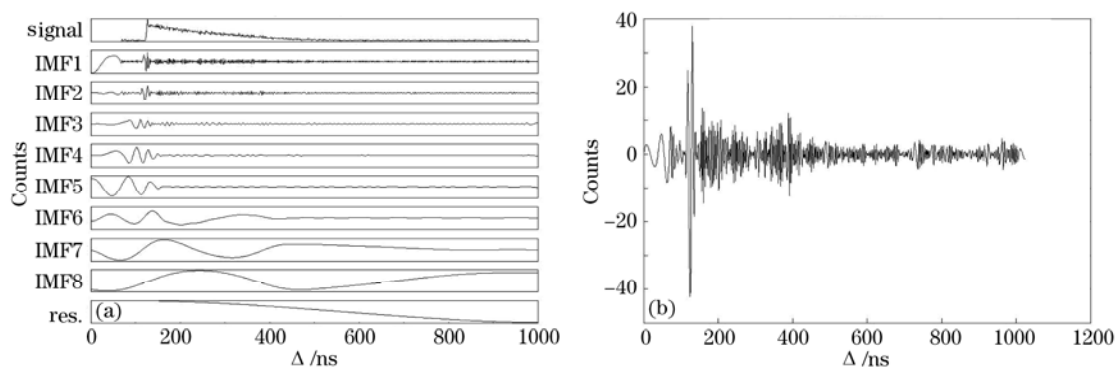


图 1 EMD 分解。(a)固有模态函数;(b)EMD 分解得到的 IMF2
Fig.1 Empirical mode decomposition. (a)intrinsic mode function; (b)IMF2 of EMD

HHT 方法对傅里叶变换的基本信号和频率定义做了创造性的改进^[8],不认为信号的基本组成是正弦信号,而是通过经验模态分解(EMD)得到的固有模态函数(IMF)信号。HHT 方法能够实现对非平稳信号的时频分析等处理。对某一裂变中子信号样本做 EMD 分解,如图 1 所示。图 1(a)中信号为含有 γ 射线等干扰成分的原裂变中子信号,IMF1~IMF8 为分解得到的 IMF, res.为残量,代表趋势项。图 1(b)为 EMD 分解得到的 IMF2。每个 IMF 均包含有各种不同的瞬时频率成分,IMF1-8 按信号局部频率从高到低排列,这是由 EMD 分解的特点决定的。它首先提取信号的高频成分,然后依次分解出低频信号分量。EMD 分解的过程可以解释为多尺度滤波过程,每个 IMF 都反映了信号的特征尺度,代表非平稳信号的内在模态特征。与傅里叶变换的全频率成分分解相比,EMD 分解是由局部频率成分决定,它的基函数来源于原信号自身,因此分解具有局域性和自适应性。

经过 EMD 分解,含噪裂变中子信号中的各个具有不同时频特征的成分,被分解到不同的 IMF 分量中。

γ 射线等噪声中具有不同时频特性的分量也随之分解到了这些 IMF 分量上。因为 γ 射线等噪声的性质与裂变中子信号不同，故各分量上有的噪声较为集中，有的则基本不含噪声，这为有针对性地对各个分量分别进行去噪处理创造了条件。

2.2 裂变中子信号的分量二次平滑度检测去噪

经过 EMD 分解得到的 IMF 分量，具备了一定程度的尺度滤波效应。采用这种方式的去噪方法称为时空滤波分析^[9,10]。其原理是简单地去掉一个或多个 IMF 分量以实现滤波，这将导致相应分量上的有用信号一起被删除，导致严重失真。此外，由于噪声分解后分布在各个 IMF 分量上，该方法去噪也不彻底。为此，对所有 IMF 分量进行相同的小波阈值去噪处理^[3]，得到去噪后各个 IMF 分量，来重构去噪后的信号。与简单的时空滤波相比，这种去噪方法并没有本质上的进步。为此，引入一种去噪效果的评价指标即平滑度^[11]

$$r = \left\{ \sum_{n=1}^k [f_0(n+1) - f_0(n)]^2 \right\} / \left\{ \sum_{n=1}^k [f(n+1) - f(n)]^2 \right\}, \quad (1)$$

式中 $f(x)$ 为原始信号， $f_0(x)$ 为去噪后的信号， k 为信号长度。平滑度为当信号足够长，小波去噪后信号的差分数的方差根与原始信号的差分数的方差根之比。此指标能反映出去噪信号的平滑程度，是信号去噪效果的一个重要评判指标，而且更是任何去噪方法的去噪效果的直观评价标准，对其进行量化具有重要的实际意义。以平滑度指标为依据，提出了一种基于 EMD 分解和二次平滑度检测(DSD)的裂变中子信号去噪处理方法(EMDSD)，其工作流程如图 2 所示。

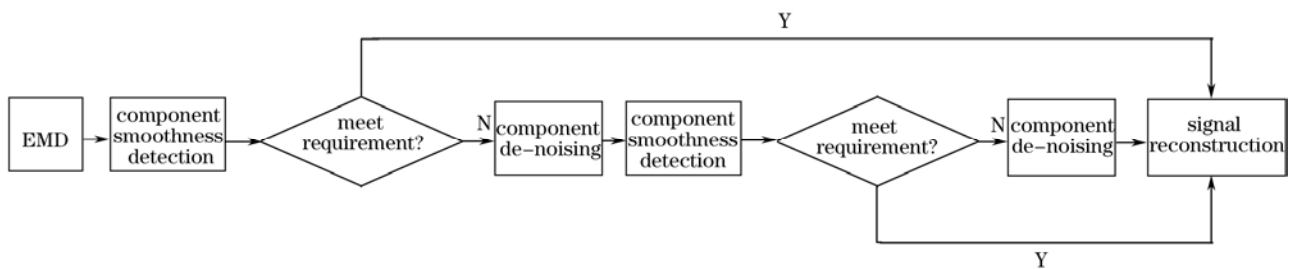


图 2 EMDSD 去噪方法工作流程
Fig.2 Work flow of EMDSD de-noising

由图 2 可知，首先含有噪声的裂变中子信号经 EMD 分解后，对得到的各 IMF 分量进行平滑度检测。当某分量与原始含噪信号相比，如果其平滑度已经达到要求，则对此分量可不做任何去噪处理，直接送入等待信号重构步骤；反之，如果分量平滑程度尚未达到要求，则进行去噪处理。然后，验收经去噪处理的各分量，再次检测其平滑度。其与去噪前相比，若其平滑度达到相应指标，则送入等待重构步骤；若仍达不到要求，则做进一步的去噪处理后，再送入等待重构步骤。最后，当所有分量处理完毕后，对所有符合平滑度指标要求的分量求和，进行信号重构。重构后的信号 $f_0(t)$ 则为最终去噪信号，可表示为

$$f_0(t) = \sum_{i=1}^m C_i(t) + C_{res}, \quad (2)$$

式中 $C_i (i=1,2,\dots,m)$ 为去噪处理后的 IMF 分量， C_{res} 表示残量。由于经历了 2 次平滑度检测过程，故称为基于 DSD 的去噪处理方法。图 3~5 展示了某裂变中子信号的 EMDSD 去噪过程，平滑度指标 r 设为 0.005。

如图 3(a)所示，该含噪裂变中子信号经 EMD 分解为 IMF1~9 及趋势项 res.共 10 个分量。此时，未去噪的原信号波形见图 3(b)。进行第一次平滑度检测，分量 IMF1~5 不合标准，需进行自适应去噪处理。

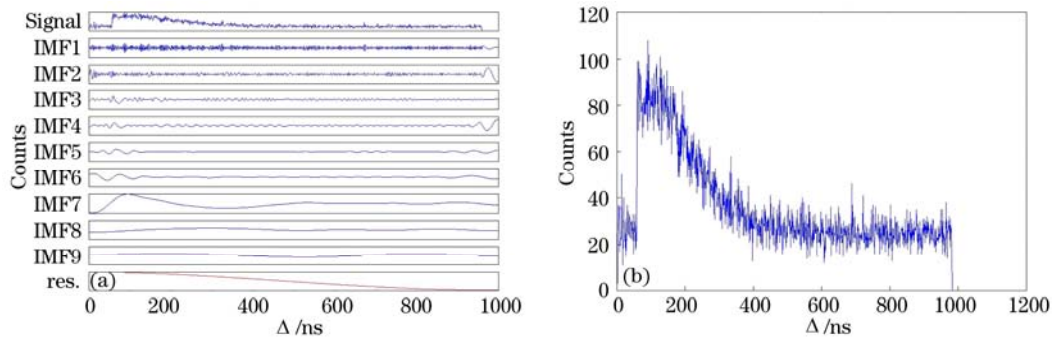


图3 含噪裂变中子信号的经验模态分解。(a)固有模态函数；(b)含噪裂变中子信号
Fig.3 EMD of noisy signal. (a) intrinsic mode function; (b) noisy signal

图4(a)为经过第一次去噪处理后的各IMF，重构出的裂变中子信号见图4(b)所示。可见，噪声大部分得到消除。进行第二次平滑度检测，验收去噪效果，IMF1~4仍不符合要求。

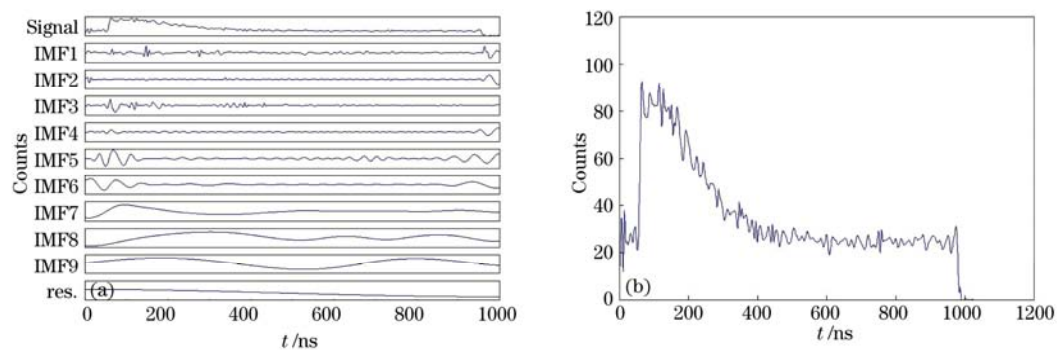


图4 含噪裂变中子信号的第一次平滑度检测去噪。(a)固有模态函数；(b)第一次平滑度检测去噪后的裂变中子信号
Fig.4 Smoothness detection de-noising in the first time. (a) intrinsic mode function; (b) treated signal

图5(a)为对IMF1~4再次进行去噪处理后的各IMF，重构裂变中子信号如图5(b)所示。可见，信号去噪效果得到了进一步提高，有效去除了 γ 射线等干扰因素对光电探测器获取的裂变中子信号的影响。

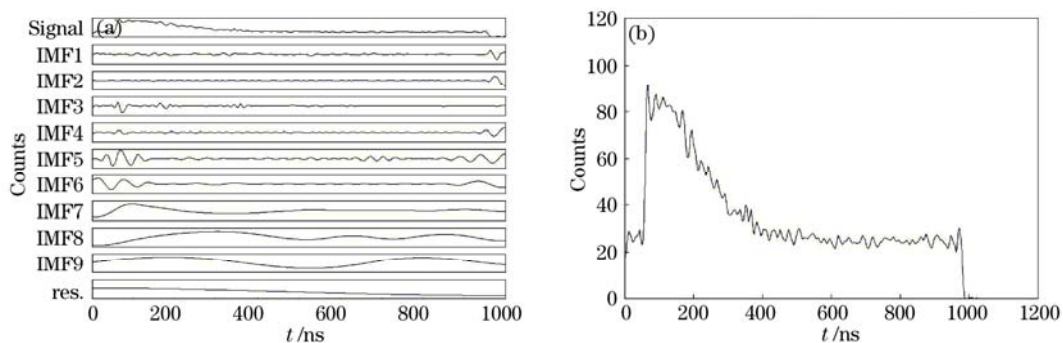


图5 含噪裂变中子信号的第二次平滑度检测去噪。(a)固有模态函数；(b)第二次平滑度检测去噪后的裂变中子信号
Fig.5 Smoothness detection de-noising in the second time. (a) intrinsic mode function; (b) treated signal

3 实验结果及讨论

对于实测的裂变中子信号，由于无法得知是否完全不含噪声的“纯净”信号，其去噪效果更多的只能依靠直观比对和对具有确切物理含义细节的判读。为了更好地验证EMDSD去噪方法的合理及有效性，采用了“heavy shine”信号加噪作为标准测试信号进行对比实验。在图6中，“原始信号”即为“heavy shine”信号，长度为1024。含噪信号是在“heavy shine”信号基础上加入信噪比为14 dB的随机噪声，以模拟 γ 射线等干扰信号对裂变中子信号的影响。对比实验了4种不同的去噪方式，分别为：1) 尺度为3的小波抑制细节去噪方法，采用的小波基为db4 (daubechies类小波的一种)；2) 时空滤波方法，去除IMF1和IMF2两个分量；3) 小波阈值去噪方法，阈值选取方式为“heursure(启发式)”，软阈值，根据每一层小波分解的

噪声水平估计进行调整, 尺度为 3, 小波基为 db4; 4) EMDSD 去噪机制, 平滑度检测指标设为 0.5%, 去噪步骤采用小波阈值去噪, 参数设置同上。去噪对比实验效果如图 6 所示。去噪效果评估体系包含均方差 σ_{MSE} , 平滑度 r , 信噪比 γ_{SNR} 三项指标

$$\sigma_{\text{MSE}} = \sqrt{\sum_{n=1}^k [f(n) - f_0(n)]^2 / k}, \quad (3)$$

$$r = \left\{ \sum_{n=1}^k [f_0(n+1) - f_0(n)]^2 \right\} / \left\{ \sum_{n=1}^k [f(n+1) - f(n)]^2 \right\}, \quad \gamma_{\text{SNR}} = 10 \lg \left[P_f / (P_{f_0} - P_f) \right], \quad (4)$$

式中 $f(x)$ 在均方差与信噪比计算中表示原始信号, 在平滑度计算中表示去噪前的信号; P_f 为原始纯净信号能量, P_{f_0} 为去噪信号能量。计算结果见表 1。

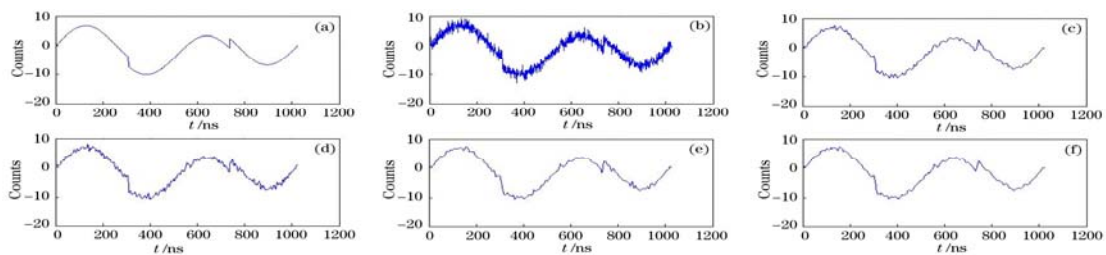


图 6 标准测试信号“heavy shine”的去噪对比实验效果图。(a)原始信号; (b)含噪信号; (c)小波抑制细节去噪; (d)时空滤波; (e)小波阈值去噪; (f)EMDSD 去噪

Fig.6 The de-noising effect of different methods on “heavy shine”. (a)original signal; (b)noisy signal; (c)detail inhibition de-noising; (d)time-space filtering; (e)wavelet threshold de-noising; (f)EMDSD de-noising

表 1 不同去噪方式的去噪效果评测一览表

Table 1 De-noising effect of different methods

	Noisy signal	Detail inhibition	Time-space filtering	Wavelet threshold	EMDSD
σ_{MSE}	1.0273	0.3876	0.4872	0.3886	0.3551
r		0.0072	0.0177	0.0067	0.0050
$\gamma_{\text{SNR}} / \text{dB}$	14.0758	22.5488	20.5840	22.5261	23.3037

由图 6 及表 1 可见, EMDSD 去噪信号的均方差最低, 平滑度效果最好, 且其信噪比最高。这说明 EMDSD 去噪机制能够最大程度地保留原信号的有用信息, 其去噪后波形与原信号相比失真最小, 同时最大程度去除了噪声影响, 获得了直观上最为平滑的曲线。此实验中, EMDSD 去噪效果最好, 小波阈值去噪法次之, 而时空滤波的去噪效果最差。

为了进一步验证 EMDSD 去噪方法对其他 3 种方法的优势, 又对另一组含噪裂变中子信号进行了去噪对比实验, 如图 7 所示, 实验参数设置同前。去噪后信号的平滑度指标依次为: 0.0744(抑制细节去噪), 0.1641(时空滤波), 0.1812(小波阈值), 0.0673(EMDSD)。可见, EMDSD 去噪效果最佳。进一步的研究还可得知, 与小波阈值等去噪方式相比, EMDSD 对去除位于信号突变点处的 γ 峰也有很好的效果。这是针对 ^{252}Cf 自发裂变中子源所构造的光电探测信息处理系统的重要功能之一。

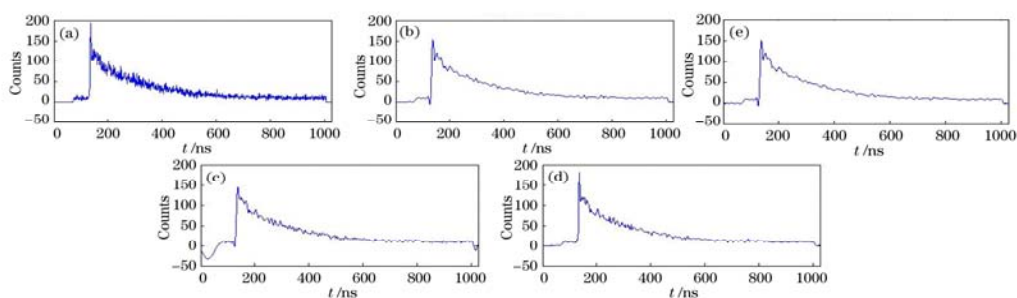


图 7 裂变中子信号去噪对比实验效果图。(a)含噪信号; (b)小波抑制细节去噪; (c)时空滤波; (d)小波阈值去噪; (e)EMDSD 去噪

Fig.7 The de-noising effect of different methods on the fission neutrons signal. (a)noisy signal; (b)detail inhibition de-noising; (c)time-space filtering; (d)wavelet threshold de-noising; (e)EMDSD de-noising

4 结 论

基于 EMD 的信号分解方式,可以保证所得分量更能反映含噪裂变中子信号的时频特性,同时有效地将噪声中不同性质的分量一并分解,利用信号与噪声在不同分量中分布的区别,对不同分量进行差异化处理。与其他“一刀切”的去噪方法相比,可保证信号的失真度最小,即均方差最小。DSD 降噪处理方法可对噪声集中的分量进行深度去噪。这既能保证去噪后信号的平滑度最优,又能自适应控制去噪的程度,避免了采用其他去噪方法时对去噪效果判断的盲目性,体现了 EMDS 去噪性能的稳定性,使信号失真度最小,即反映到信噪比指标上,去噪信号的信噪比较高。小波阈值去噪法,其阈值计算方式将导致在处理类似于 γ 峰等较大突变时的能力不高。虽然 EMDS 在其去噪过程中采取了同样的小波阈值法,但由于 EMD 分解使 γ 峰等干扰信号被分解到各个分量上进行深度去噪,使难点得到化解,取得了满意的去噪处理效果。

参 考 文 献

- 1 Liu Cheng'an, Wu Jun. An Introduction of Verification Technology of Nuclear Arms Control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. 26~40
刘成安, 伍 钧. 核军备控制核查技术概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 26~40
- 2 Zhao Zhijin, Yuan Huiqin, Guo Dianwu. The extraction of signal instantaneous parameters based on Hilbert-Huang[J]. *Signal Processing*, 2005, **21**(4A): 423~426
赵知劲, 袁慧琴, 郭殿武. 基于Hilbert-Huang的信号瞬时参数提取[J]. 信号处理, 2005, **21**(4A): 423~426
- 3 Du Xiuli, He Lizhi, Hou Wei. A study of wavelet threshold denoising based on empirical mode decomposition(EMD)[J]. *J. Beijing University of Technology*, 2007, **33**(3): 265~272
杜修力, 何立志, 侯 伟. 基于经验模态分解(EMD)的小波阈值除噪方法[J]. 北京工业大学学报, 2007, **33**(3): 265~272
- 4 J. K. Mattingly, T. E. Valentine, J. T. Mihalcz. NWIS Measurements for Uranium Metal Annular Castings[R]. The U.S.Department of Energy Report No. Y/LB-15.971, 1998: 1~12
- 5 J. T. Mihalcz, T. E. Valentine, J. A. Mullens *et al.*. Physical and Mathematical Description of Nuclear Weapons Identification System(NWIS) Signatures [R]. The U.S.Department of Energy, Report No. Y/LB-15.946 R3, 1997. 3~14
- 6 J. K. Mattingly. High Order Statistical Signatures from Source-Driven Measurements of Subcritical Fissile Systems[D]. Knoxville: University of Tennessee, 1998: 1~14
- 7 Liu Yingmei, Bai Xiaomin, Yi Su *et al.*. Compression of power system disturbance signals based on least maximum method[J]. *Power System Technology*, 2004, **28**(3): 33~37
刘应梅, 白晓民, 易 俗 等. 基于最小极大法的电力扰动信号压缩[J]. 电网技术, 2004, **28**(3): 33~37
- 8 Tang Guiji, Xiang Ling, Zhu Yongli. Fault analysis of oil whirl and oil whip based on Hilbert-Huang transform for rotor system[J]. *Proc. CSEE*, 2008, **28**(2): 77~81
唐贵基, 向 玲, 朱永利. 基于HHT的旋转机械油膜涡动和油膜振荡故障特征分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, **28**(2): 77~81
- 9 Tan Shanwen, Qin Shuren, Tang Baoping. The filtering character of Hilbert-Huang transform and its application[J]. *J. Chongqing University(Natural Science Edition)*, 2004, **27**(2): 9~12
谭善文, 秦树人, 汤宝平. Hilbert-Huang变换的滤波特性及其应用[J]. 重庆大学学报, 2004, **27**(2): 9~12
- 10 Wang Chun, Peng Dongling. The Hilbert-Huang transform and its application on signal de-noising[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2004, **25**(4): 42~45
王 春, 彭东林. Hilbert-Huang变换及其在去噪方面的应用[J]. 仪器仪表学报, 2004, **25**(4): 42~45
- 11 Chen Qiang, Huang Shengxiang, Wang Wei. An evaluation indicator of wavelet denoising[J]. *J. Geomatics*, 2008, **33**(5): 13~14
陈 强, 黄声享, 王 韦. 小波去噪效果评价的另一指标[J]. 测绘信息与工程, 2008, **33**(5): 13~14