

文章编号: 1001-4322(2006)02-0281-05

小波分析在强流直线感应加速器信号处理中的应用*

杨兴林, 王华岑, 徐铁铮, 李 劲

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 应用小波变换具有良好的时频局部特性,通过对强流直线感应加速器(LIA)脉冲信号的去噪声、信号突变点检测以及时间间隔测量等处理,表明小波变换在LIA信号处理中有广泛的应用前景;利用小波包分析的每个节点都代表了对应频带的信号特征的特点,对“神龙一号”快脉冲波形数据进行小波包变换,以各频带信号能量为元素构造特征向量,实现了高维波形数据的特征值提取,达到了数据压缩和降维的目的,为进一步实现LIA故障智能诊断、预测维护提供了一种可行的途径。

关键词: 小波分析; 信号消噪; 突变点检测; 特征向量

中图分类号: TL507 **文献标识码:** A

强流直线感应加速器(LIA)的脉冲功率、注入器、加速段、束流输运等系统之间相互关联和相互影响^[1],整机调试、运行和性能评价是难度较大的工作,需要调试人员具备丰富的物理知识和调试经验。基于模式识别、人工智能等方法,建立的LIA故障诊断系统^[2-5],不仅可以提供加速器运行状态的快速判断、性能评价,还可探测到整机性能缓慢变化趋势,为系统的精细维护提供保障^[5]。国内在这方面的研究尚处于起步阶段。“神龙一号”每次试验需要记录的快脉冲信号大约有400路,每路信号记录的点数都超过1000,要建立“神龙一号”的智能故障诊断系统,首先要解决的是如何实现数量庞大、高维数信号的特征向量提取,降低数据维数,以便于建立基于模式识别、神经网络等的诊断系统,避免可能造成的“维数灾难”。法国人在AIRIX上建立基于神经网络的故障诊断系统时,首先研究了波形信号处理方法,先后采用主元分析PCA(Principle Component Analysis)、曲线元分析CCA(Curvilinear Component Analysis)等分析方法来实现特征向量的提取^[2-4],这表明,信号处理和特性向量的提取是建立故障诊断系统的先决条件。

小波变换具有多分辨率分析的特点,在时频两域都具有表征信号局部特征的能力,在信号处理方面有广泛的应用^[6-9]。本文应用小波变换实现了强流LIA波形信号的去噪、突变点检测以及时间间隔测量等信号处理;小波包分析的每个节点都代表了信号对应频带的特征,应用小波包分析实现波形数据特征向量提取,该向量能表征脉冲信号的平顶、脉宽、暂态变化等,向量维数也明显降低,为进一步建立LIA故障诊断、预测维护系统打下了基础。

1 理论基础

1.1 小波及小波包变换

满足允许条件的基本小波 $\Psi(t) \in L^2(R) \times L^2(R)$ (表示平方可积的实数空间),引入尺度因子 a 和平移因子 b ,将基本小波进行伸缩和平移,得到以下函数簇^[10]

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

式中: $\Psi_{a,b}(t)$ 为分析小波。函数 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换CWT定义为

$$\text{CWT}_{a,b} = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (2)$$

小波变换克服了傅里叶变换对信号在时域无分辨的缺陷,在高频处采用短时窗提高时间分辨率,在低频处采用长时窗提高频率分辨率。当进行小波分解时,得到的高频信号和低频信号就在这个频域中分别占据了一半宽的频带,再次用小波分解时,又把低频部分分为两个同样宽度的频带。

小波包分解对高频部分也进行分解,能在所有频带范围聚焦。对一个离散信号,小波包分解由下面的递推

* 收稿日期 2005-07-15; 修订日期 2005-11-23

作者简介: 杨兴林(1969—),男,博士研究生,从事加速器控制、故障智能诊断研究, yang_xl2008@163.com。

公式确定

$$\begin{cases} u_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in z} h(k) u_n(2t - k) \\ u_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in z} g(k) u_n(2t - k) \end{cases} \quad (3)$$

式中 u_{2n} 和 u_{2n+1} 为小波分解序列 n 为尺度参数。(3)式可以理解为信号 u_n 经过正交共轭滤波器分解为频带各占一半的低频近似部分和高频细节部分。滤波器系数 $h(k)$ 和 $g(k)$ 由小波 $\Psi_{2^n, \beta}(t)$ 确定。

1.2 特征向量构建

信号经过小波包分解后,每个节点都代表了对应频带的信号特征,通过对小波包分解系数重构的方法,可提取各频带范围的特征向量。只要小波包分析的深度足够,就完全可以以较少的数据维数表征信号,从而实现数据降维和特征提取。因此,可以以各频带信号能量为元素构造一个特征向量。下面以对信号进行三层分解为例,说明特征向量的构造方法。

如果只对第三层的所有节点进行分析,以 S_{3j} 表示第三层第 j 分解节点的重构信号。设 S_{3j} 对应的能量为 E_{3j} , 则有

$$E_{3j} = \int |S_{3j}(t)|^2 dt \quad (4)$$

特征向量 T 可以按如下的方式构成

$$T = [E_{30} \ E_{31} \ E_{32} \ E_{33} \ E_{34} \ E_{35} \ E_{36} \ E_{37}] \quad (5)$$

2 结果分析与讨论

2.1 信号消噪

由于强流 LIA 快脉冲信号的采样频率达 500 MHz,所以不可避免地会含有高频噪声,以实测的 Blumlein 形成线波形为例,幅值为 1.3 V 时,基线上有 40~80 mV 的噪声电平,这给准确确定信号的上升沿、下降沿和脉冲宽度等物理参数带来一定的困难。传统的滤波方法在消噪的同时,也使信号的突变部分平滑,信号的一些瞬变信息随之消失,而这种信号突变在强流 LIA 脉冲信号的分析中很重要。小波变换时,信号和噪声信号有着不同的性质,可以进行信噪分离,为信号消噪提供了重要途径。

小波变换进行信号消噪的步骤为(1)对原始信号进行小波分解。假设噪声为白噪声,其小波变换系数随变换的级数增大而有规律地减小,而有用信号变换后的细节信号的幅度和方差不随尺度的增加而减小。利用噪声和有用信号随变换尺度的增加的不同表现,可以确定合适的分解层数。本应用选用正则性较好的 db4 (Daubenchies 4)小波,分解层数为 5 层。(2)按一定的准则,采用软、硬阈值对每一级小波系数进行阈值量化处理。本文选用无偏风险准则的软阈值方法。(3)对量化处理后的各级小波系数进行信号重构。按上述原则对图 1(a)所示的脉冲功率系统的主开关放电波形进行处理,图 1(b)和图 1(c)分别为经过无偏风险准则和固定门限处理后的重构信号。作为比较,图 1(d)为传统的傅里叶低通滤波的结果。

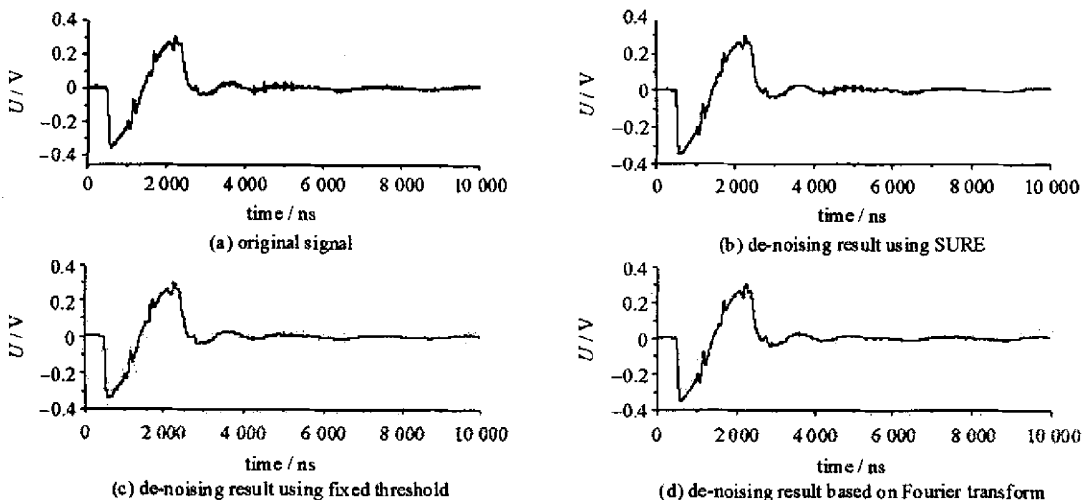


Fig. 1 De-noising effects based on wavelet and Fourier transform

图 1 小波去噪应用实例

可以看出(1)消噪处理不需要对分析对象和信号的噪声水平的先验知识。(2)小波去噪在改善信噪比的同时,还可以保留信号突变点的信息,因此特别适用于时变信号和突变信号的去噪声处理。(3)存在一个合适的分解层数,大于这个层数,对信噪比改善不大,甚至出现变坏的情形。(4)阈值准则的选取影响信噪比和均方根误差,如固定门限方法可提高信噪比,但均方根误差却增大。针对本文所分析的信号的高频信息只有很少一部分在噪声范围内的特点,选用无偏风险准则比较有效。

2.2 信号突变点的检测

脉冲功率系统的点火机发出的触发脉冲经过增强器、一级、二级发散装置逐步增强,经 Blumlein 脉冲成形,输出为脉宽 90 ns 左右,电压 250 kV 的脉冲。检测信号突变点(触发点)以及脉冲功率系统各级装置动作的时间间隔,是信号诊断中的重要内容。由于高频噪声的存在,通常准确判断触发点是很困难的。

当信号在某一时刻发生突变时,该信号的小波变换在一定的尺度范围内会在信号突变处出现峰值,有效信号突变点所对应的小波变换模极大值具有沿尺度传递的性质,而随机噪声信号的小波变换模极大值将随着尺度的增加而迅速衰减。通过选择合适的尺度参数,可以在噪声背景下,准确地检测到突变信号。

选用 db4 对图 2 所示的 Blumlein 开关触发级的典型波形 s 进行 5 层分解。该信号采样率为 500 MHz,记录长度为 5 000 点。从图 2 可以看出,在分解的 d_1 和 d_2 高频部分上,主要体现噪声的影响,但在 d_2 上信号突变点的小波变换模极大值较大,特征明显。在 d_3 上基本没有噪声的影响,到 d_5 模极大值特征基本消失。图 3 是图 2 在突变点附近的放大效果,图 4 为图 3 的信号重构。在信号 s 上的 a 点对应气隙开关触发电极触发起始点, b 点对应气隙开关触发极和阳极导通点, c 点对应触发极和地导通点,分别表现在 d_2 尺度上的 a, b, c 三个极大值点。模极大值点随尺度的增加而表现出一定的传递关系,如 d_2 的 b, c 两点在 d_3 上是两个过零点,在 d_4 上又表现为模极大值点。但随着尺度的增加,虽然极值点相对稳定,由于平滑的作用,使突变点的定位出现偏差。因此,在噪声影响不大的较小的分解尺度检测突变点,并结合多尺度进行分析、定位是较好的选择。

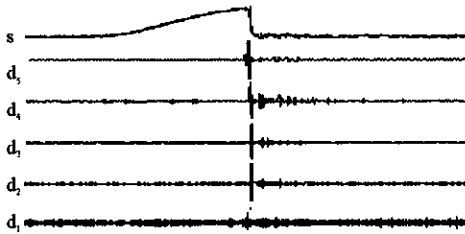


Fig. 2 Main switch signal and wavelet coefficients

图2 开关信号及小波分解系数

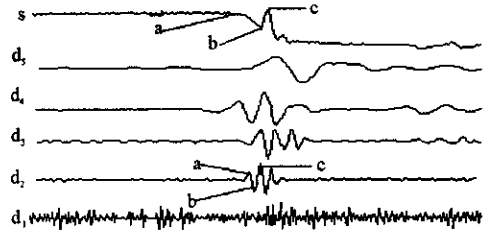


Fig. 3 Details of the singular points

图3 突变点附近开关信号及小波分解系数放大图

为了检测两个信号突变点之间的时间间隔,本文把待检测的波形逐点相加为一个合成波形,然后进行小波变换。图 5 中的 s_1 为增强器触发波形, s_2 为上述的 Blumlein 波形, s_3 是合成波形。对 s_3 采用 db4 小波进行 5 层分解。提取 d_2 上的小波系数模极大值点,计算出其触发的时间间隔为 $3.85 \mu\text{s}$,与实际测量结果一致。上述结果表明,利用小波变换检测脉冲功率系统中具有突变特征的信号的突变点定位是十分有效的。

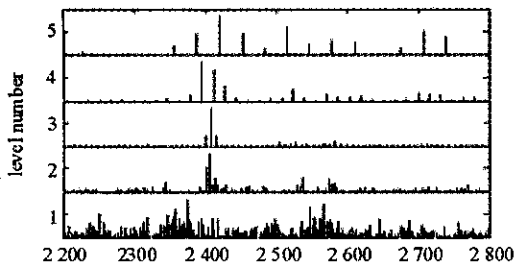


Fig. 4 Signal reconstruction of coefficients

图4 高频系数重构信号

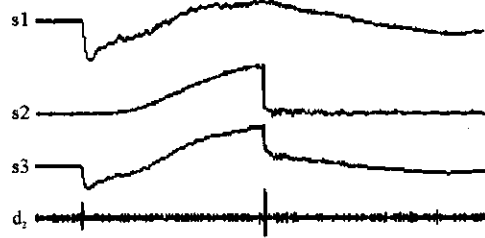


Fig. 5 Combination signal and wavelet transform

图5 合成信号及小波分解

2.3 应用小波包提取特征向量

小波包分析能够对小波分析未细分的高频部分再做分解,从而可获得信号在各频段频率成分能量的变化,可反映快脉冲信号前沿、平顶、脉宽等特征,以这些能量作为信号的特征向量,可进一步对信号做故障诊断、趋势预测等。

本文针对带束的加速腔信号,应用小波包分析提取其特征向量。LIA 电子束正好位于加速电压的中部,可

获得最好的加速效果。由于开关系统的时间抖动等因素,会造成加速电压和电子束不同步,而导致波形畸变。图 6 (a)是同步较好的带束腔电压波形 (b)和 (c)为同步较差的波形。

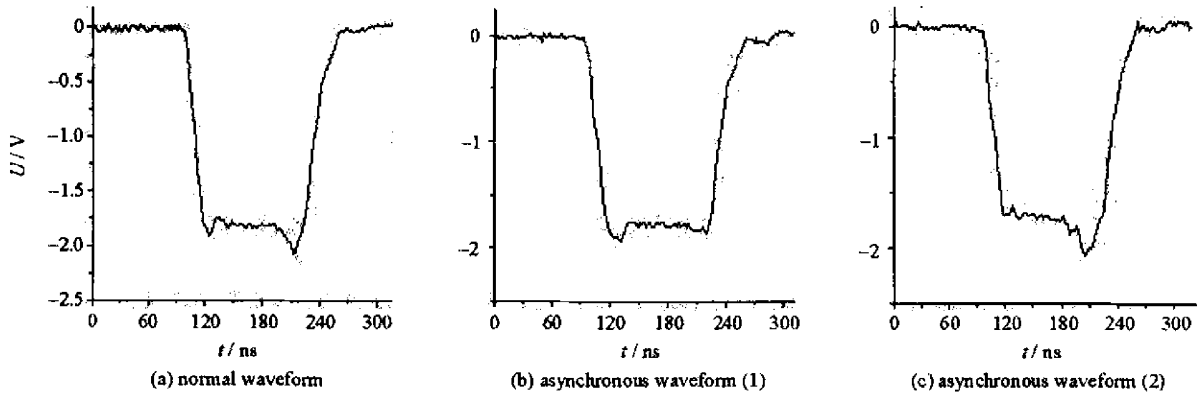


Fig. 6 Typical voltage waveform of accelerator cell

图 6 典型的腔电压波形

为了对加速脉冲作精细分析,对原始波形作了以下处理:应用前述的突变点检测方法,判定信号下降沿的时间点,以此点作为基准点,向左右分别外推,获得待分析的信号;以正常信号的均值作为参考信号,测量信号与参考信号的差值作为分析的对象,以突出信号的细微差别,获得较丰富的信号频率成分。图 7 中 (a)为以信号下降沿突变点为基准处理后的信号 (b)为该信号与参考信号的差值 (c)和 (d)分别为正常信号和同步较差信号的傅里叶变换示意图。从图 7 (c)和 (d)的傅里叶变换来看,出现傅里叶变换极大值的频点和幅值都有较大的差别。选用合适的母小波和分解层数可以在傅里叶变换频点的极大值也能在小波包变换相应的频带出现极大值。当测量信号采样率为 500 MHz,采用 $rbio3.9$ 小波进行 7 层的小波包分解,能较好表征测量信号的频点极值情况,特别是能区分信号低频部分中差别较大的情况。表 1 是 6141 到 6145 发试验的带束腔电压信号在小波包分解第 7 层上的分解按 (3) (4) 式的部分计算结果,其中 6141 发试验对应图 6 (b) 的情形。

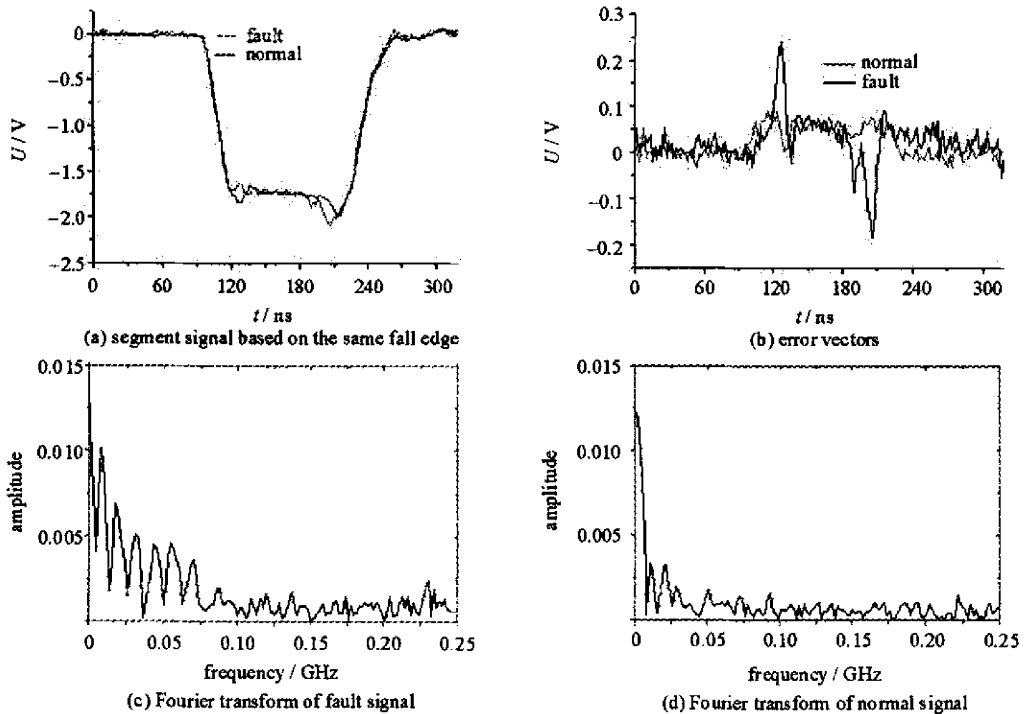


Fig. 7 Waveform processing and Fourier transform

图 7 波形处理及傅里叶变换

从表中可以看出,6141 发试验信号的傅里叶变换极大值的频点对应的小波包分解的频带上的 E_{73} , E_{75} , E_{77} , E_{79} 等能量,与其它样本有显著的差别。比较 6141 发的 E_{76} , E_{77} , E_{78} , 可以看出,傅里叶变换取得极大值,小波包能量也取极大值。选取第 7 层中的前 30 个分解结点的能量,基本涵盖了信号主要的频率特性,构造的特

征向量能够代表信号的特征,实现了数据降维。

表 1 小波包分解的特征向量

Table 1 Characteristic vector using wavelet packet

samples	E_{73}	E_{75}	E_{76}	E_{77}	E_{78}	E_{79}	E_{710}	E_{712}	E_{715}	E_{723}
6141	0.066 966	0.035 578	0.121 460	0.229 470	0.148 670	0.150 690	0.081 901	0.078 699	0.060 479	0.055 061
6142	0.028 380	0.012 507	0.010 847	0.053 284	0.067 979	0.009 359	0.027 229	0.019 737	0.032 514	0.020 342
6143	0.043 267	0.014 486	0.089 316	0.014 851	0.076 787	0.054 719	0.067 070	0.034 888	0.030 631	0.010 523
6144	0.033 988	0.025 485	0.062 642	0.012 353	0.043 773	0.008 586	0.027 392	0.013 318	0.023 520	0.014 805
6145	0.016 370	0.002 536	0.037 377	0.037 520	0.042 106	0.013 910	0.017 327	0.008 266	0.002 333	0.019 868

3 结 语

从以上分析可以看出,小波以及小波包分析在 LIA 测量波形的噪声消除、信号突变点检测、特征向量提取等方面是一种有效的途径,为 LIA 测试信号的分析处理提供了一种新方法,特别是所提取的特征向量表征了波形数据的特征,大幅降低了数据维数,也为今后 LIA 故障诊断与预测系统的研制打下了基础。

参考文献：

- [1] 邓建军. “神龙一号”直线感应加速器物理设计[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(5): 502-504. (Deng J J. Physical design of the Dragon- I linear induction accelerator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(5): 502-504)
- [2] Ribes J C, Delaunay G, Delvaux J, et al. RBF classifier for the AIRIX accelerator fault diagnosis[C]//Proceedings of LINA2000. Monterey, 2000.
- [3] Merle E, Delvaux J, Mouillet M, et al. Automatic analysis and classification of the AIRIX single shot accelerator defaults[C]//Proceedings of PAC2001. Chicago 2001.
- [4] Merle E, Bombardier F, Delvaux J, et al. Progress with the 2-3 kA AIRIX electron beam[C]//Proceedings of EPAC2002. Paris, 2002.
- [5] Lyautey J F, Mouillet M, Garbay C, et al. AIRIX high voltage generators analysis for predictive maintenance[C]//Proceedings of EPPS2004. Hamburg, 2004.
- [6] 张吉先, 钟秋海, 戴亚平. 小波门限消噪法应用中分解层数及阈值的确定[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 118. (Zhang J X, Zhong Q H, Dai Y P. The determination of the threshold and the decomposition order in threshold de-noising method based on wavelet transform. *Proceedings of the China Society for Electrical Engineering*, 2004, 24(2): 118)
- [7] 刁彦华, 王玉田, 陈国通. 基于小波变换模极大值的信号奇异性检测[J]. 河北工业科技, 2004, 21(1): 1. (Diao Y H, Wang Y T, Chen G T. Singularity detection of signals based on wavelet transform modulus maximum. *Hebei Journal of Industrial Science and Technology*, 2004, 21(1): 1)
- [8] 张丽丽, 颜毅华. 太阳射电爆发精细结构的特征提取和参数统计[J]. 中国科学院研究生学报, 2004, 21(1): 33. (Zhang L L, Yan Y H. Pattern recognition and parameter statistics of fine structures in the solar radio bursts. *Journal of Graduate School of Chinese Academy of Sciences*, 2004, 21(1): 33)
- [9] 朱博丽, 张吉堂. 小波分析在火箭发动机包覆质量检测中的应用[J]. 无损检测, 2004, 26(1): 18. (Zhu F L, Zhang J T. Application of wavelet analysis to the bonding quality diagnosis of rocket motor coating. *Nondestructive Testing*, 2004, 26(1): 18)
- [10] 杨福生. 小波变换与工程分析应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000. (Yang F S. Wavelet transform analysis application. Beijing: Science Press, 2000)

Methods of signal processing in LIA based on wavelet transform

YANG Xing-lin, WANG Hua-cen, XU Tie-zheng, LI Jin

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-106, Mianyang 621900, China)

Abstract: According to the time-frequency localization properties of wavelet transform, the application methods in pulse signal's de-noising and singularity detection show good performance in signal processing of high current LIA. A method to extract characteristic parameters from energy on the coefficients of wavelet packet transform of Dragon- I's waveforms is presented. Parameters, which are extracted from the relevant frequency bands and are used as vector, represent jointly temporal position and frequency variation of waveform. Such characteristic vector can be applied to further signal processing and fault diagnosis of high current LIA.

Key words: Wavelet transform; Signal de-noising; Singularity detection; Characteristic vector