电能质量暂态扰动的 HS 变换检测方法

黄南天[1,2]，徐殿国[1]，刘晓胜[1]，蔡国伟[2]

（1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院，150001 哈尔滨；2. 东北电力大学 电气工程学院，132012 吉林 吉林）

摘　要： 为提高电能质量暂态扰动检测定位能力，设计一种采用 Hyperbolic S 变换（HS 变换）的扰动检测方法. 在采用 HS 变换处理电能质量信号的基础上，通过计算 HS 变换模矩阵上各采样点不同频率对应的幅值之和来定位扰动起止点. 新方法首先通过阈值对幅值和曲线进行预处理；之后，采用峰值点定位扰动起止时间. 仿真实验证明，新方法实现了不同参数条件下电压暂降、电压暂升、电压中断、电磁脉冲、电压尖峰、电压切痕、振荡暂态等 7 种扰动的准确检测. 该算法具有较好的鲁棒性与抗噪性，受不同扰动参数影响较小，符合实际环境下的扰动定位要求.

关键词： 电能质量；电能质量暂态扰动；Hyperbolic S 变换；扰动检测；扰动定位

中图分类号： TM714.3　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 0367－6234(2013)08－0066－07

Detection of power quality disturbances utilizing HS－transform

HUANG Nantian[1,2], XU Dianguo[1], LIU Xiaosheng[1], CAI Guowei[2]

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;
2. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, 132012 Jilin, Jilin, China)

Abstract: To improve the accuracy of disturbances detection and localization, a new approach based on Hyperbolic S-transform (HST) is constructed in this paper. After the modular matrix of power quality signal is calculated by the HST, the disturbance is detected and located by the sum of amplitudes of each sample point. The sum of amplitude is processed by threshold at first. Then, the points with the peak value are extracted for disturbances detection. The experimental results show that the new method realizes the accurate detection and localization of 7 types of disturbances including voltage sag, swell, interruption, pulse, spike, notch and transient. The simulation on ideal signals proves that the new method has the good adaptability and noise intensity. The extent of disturbances parameters has little impact on this proposed method. The method is very satisfied for disturbances location in real power system.

Key words: power quality; power quality disturbance; Hyperbolic S-transform; disturbance detection; disturbance localization

电能质量暂态扰动检测是电能质量监控的重要内容. 准确检测并定位电能质量暂态扰动的起止时刻对于扰动源定位、扰动分析等具有重要的意义. 常用的扰动检测方法包括数学形态学方法[1－2]、短时傅里叶变换[3]、小波变换[4－5]、Hilbert-Huang 变换[6]、S 变换[7]等，这些方法有较好的定位效果. 但现有研究多采用可视化方法定位扰动起始点，未给出可由计算机自动完成的暂态扰动自动定位方法，以上研究成果未充分考虑不同暂态参数（如振荡衰减系数等）对定位结果的影响；此外，针对持续时间短、电压幅值变换小的电压切痕、电压尖峰等进行定位的研究较少.

除扰动检测外，电能质量暂态监控还包括暂态扰动识别[8]、暂态源定位[9]、扰动参数确定[10]等. 随着电能质量越来越受到研究人员与电力用户的重视，需要采用统一方法，能使系统同时完成

收稿日期： 2012－11－23.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目（51237002，51177010，51277042）；吉林省教育厅“十二五”科学技术研究项目(2011262).
作者简介： 黄南天(1980—)，男，讲师，博士；
徐殿国(1960—)，男，教授，博士生导师；
刘晓胜(1963—)，男，教授，博士生导师；
蔡国伟(1968—)，男，教授，博士生导师.
通信作者： 黄南天，huangnantian@126.com.

电能质量暂态现象各种分析，以提高暂态分析整体效率. 同时，传统的可视化人工定位方法已经不能满足实际需求，需要给出可靠的自动定位方法.

S 变换具有良好的时 - 频分辨率，可以提取大量时 - 频特征用于暂态监控，已经应用于扰动识别[11]、扰动检测[7]、扰动源定位[12]、扰动参数检测[13]等领域. 采用 S 变换能够建立同时具有多种分析功能的综合电能质量分析系统，进而减少采用不同方法分析不同问题带来的计算量.

现有研究[1-7]证明，不同类型的暂态扰动现象具有不同的信号特征，所以，需要根据信号类型设计具有针对性的自动检测方法. 这就要求扰动分析系统具有更高的分类准确率，并在准确识别扰动类型的基础上，正确调用自动检测方法. 而且，传统 S 变换采用固定宽度的高斯窗函数，其时 - 频分辨率变化趋势不变，对畸变幅度较小的电能质量扰动提取特征效果较差，影响了分类识别的准确率，进而造成自动检测方法的调用错误，分类准确率不能完全满足分类要求.

考虑电能质量暂态信号在高频部分突变更加明显[14]，而 Hyperbolic 窗函数在高频部分具有更高的时间分辨率，本文使用采用 Hyperbolic 窗函数的 Hyperbolic S 变换[15-16]（Hyperbolic S-transform，HS 变换）处理电能质量暂态信号，在保留传统 S 变换暂态分析能力基础上，具有更好的时频分辨率与暂态分析能力[17]. 尤其在分析持续时间短、畸变幅值小的暂态现象时，相对传统 S 变换具有更好的定位能力.

本文通过计算 HS 变换模矩阵的频率幅值和定位暂态，考虑不同扰动信号特征，针对不同扰动设计具有针对性的检测方法. 通过扰动起止时刻的频率幅值和曲线峰值点实现暂态定位. 本文新方法能够准确检测定位电压暂降、电压中断、电压暂升、电压切痕、电压尖峰、电磁脉冲、暂态振荡等 7 种暂态现象.

1　HS 变换原理

1.1　S 变换

Stockwell[18]于 1996 年提出了 S 变换（S-transform）方法. 设输入信号为 $h(t)$，经过 S 变换后为 $S(\tau,f)$，即

$$S(\tau,f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)g(\tau - t,f)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}2\pi ft}\mathrm{d}t, \quad (1)$$

$$g(\tau,f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\left(\frac{t^2}{2\sigma^2}\right)}. \quad (2)$$

其中：$g(\tau,f)$ 为高斯窗口，参数 τ 控制高斯窗口在时间轴上的位置，$\sigma = \frac{1}{|f|}$，当 σ 确定时，时 - 频窗口的窗函数时间宽度也随之确定.

信号 $h(t)$ 可以由其 S 变换 $S(\tau,f)$ 很好地重构，S 逆变换为

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty}\left\{\int_{-\infty}^{\infty} S(\tau,f)\,\mathrm{d}\tau\right\}\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\pi ft}\mathrm{d}f. \quad (3)$$

经离散傅里叶变换可以得到 S 变换的离散形式为

$$h[kt] = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}\left\{\sum_{j=0}^{N-1} S\left[\frac{n}{NT},jT\right]\right\}\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\pi nk}. \quad (4)$$

其中：N 为总采样点数；$j = 0,1,\cdots,N-1$；$n = 0,1,\cdots,N-1$.

离散 S 变换结果为一个二维矩阵，称 S 矩阵（S-matrix）. S 矩阵的列对应采样时间点；行对应归一化频率值，频率范围为单位时间采样点数的一半；矩阵元素为复数幅值. 对矩阵各元素求模后得到 S 模矩阵，列向量代表某时刻信号幅频特性，行向量代表信号在某频率下的时域分布.

1.2　HS 变换

非平稳信号不同频率成分信号发生畸变时特点不同. 其中，信号的高频部分变化剧烈，而低频部分变化相对平稳[14]. 传统 S 变换所使用的高斯窗函数的时频分辨率对其所观察的各个频率成分具有不变性，不能根据扰动信号中不同频率成分的变化特点给出具有针对性的时间窗口.

为解决此问题，Pinnegar[18]采用 Hyperbolic 窗函数代替传统 S 变换使用的高斯窗函数，新方法称为 HS 变换（Hyperbolic S Transform）.

Hyperbolic 窗函数定义为

$$W_{hy} = \frac{2|f|}{\sqrt{2\pi(\alpha_{hy} + \beta_{hy})}}\exp\left\{\frac{-f^2X^2}{2}\right\}, \quad (5)$$

$$X = \frac{\alpha + \beta}{2\alpha\beta}(\tau - t - \xi) + \frac{\alpha - \beta}{2\alpha\beta}\sqrt{(\tau - t - \xi) + \lambda}. \quad (6)$$

Hyperbolic 窗为非对称可变窗函数，α_{hy} 为前向锥度，β_{hy} 为后向锥度，且 $0 < \alpha_{hy} < \beta_{hy}$. 参数 ξ 确保窗函数尖峰出现在 $(\tau - t) = 0$ 处，且

$$\xi = \sqrt{\frac{(\alpha_{hy} - \beta_{hy})^2\lambda_{hy}^2}{4\alpha_{hy}\beta_{hy}}}. \quad (7)$$

离散 HS 变换形式为

$$S[n,j] = \sum_{m=0}^{N-1} H[m + n]G(m,n)\exp(\mathrm{i}2\pi mj). \quad (8)$$

其中：N 为总采样点数；$n = 0,1,\cdots,N-1$；$m = 0,1,\cdots,N-1$；$j = 0,1,\cdots,N-1$.

$G(m,n)$ 为变换过程中所使用的 Hyperbolic

窗函数，即

$$G(m,n) = \frac{2|f|}{\sqrt{2\pi(\alpha_{hy}+\beta_{hy})}}\exp\left(\frac{-f^2X^2}{2n^2}\right), \tag{9}$$

$$X = \frac{(\alpha_{hy}+\beta_{hy})}{2\alpha_{hy}\beta_{hy}}t + \frac{(\alpha_{hy}-\beta_{hy})}{2\alpha_{hy}\beta_{hy}}\sqrt{t^2+\lambda_{hy}^2}. \tag{10}$$

$H(m,n)$ 为输入的电能质量信号时间序列 $h(k)$ 的频移离散傅里叶变化结果，且

$$H(m,n) = \frac{1}{N}\sum_{m=0}^{N-1}h(k)\exp(-\mathrm{i}2\pi nk). \tag{11}$$

Pinnegar[18] 在设计 HS 变换过程中发现，当 $\beta_{hy}=1.5$，$\alpha_{hy}=0.5$ 且 λ_{hy} 的值略小于 f_p（f_p 为扰动发生频率）时，其分析效果较好. 因此，假定电力系统基频为 50 Hz，考虑多数常见扰动如电压的暂降等，其扰动多发生于基频附近，并通过实验，最终本文确定 HS 变换的窗函数的参数为

$$\begin{cases}\alpha_{hy}=0.5,\\ \beta_{hy}=1.5,\\ \lambda_{hy}=1/50.\end{cases} \tag{12}$$

2 采用 HS 变换的扰动检测方法

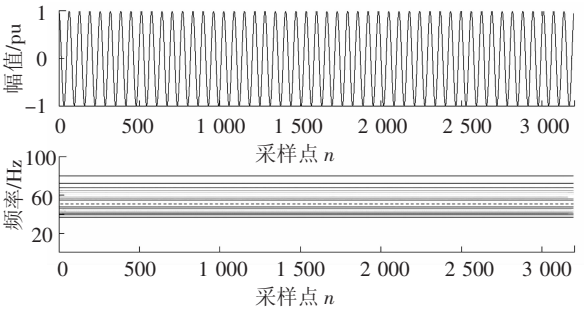
HS 变换过程中需要确定的参数较多，本文采用文献[18]中的相关参数设置. 以仿真生成的电压暂降信号为例，验证 HS 变换的暂态定位能力. 图 1 为电压暂降原始信号及其经过 HS 变换后的等高线图. 其中，设电能质量信号基频为 50 Hz，考虑电力系统谐波控制一般集中于 13 次以下的奇次谐波，由香农采样定理可知，采样频率至少应在 2.6 kHz 以上.

由图 1 可以发现，当无扰动发生时，经 HS 变换得到的等高线图无尖峰且集中于基频附近；当发生电压暂降时，等高线图在扰动起、止处出现明显的尖峰.

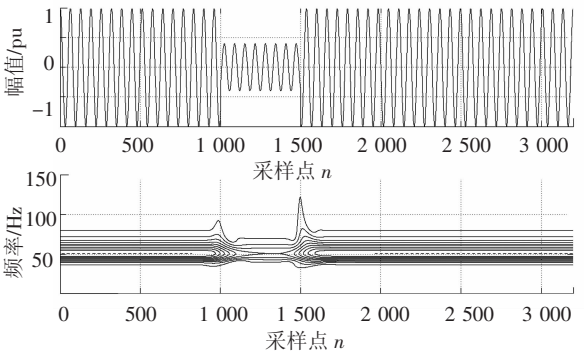
文献[7]采用 S 变换模矩阵幅值平方和均值定位暂态，但是当暂态持续时间较短、电压畸变度较小时，该方法可能失效. 综合比较计算量、定位能力等，本文选用 HS 变换模矩阵各列之和，即各个采样点不同频率对应幅值之和，实现暂态扰动定位. 各时间点幅值和计算方法为

$$\mathrm{Sum}(i) = \int|x(t)|\,\mathrm{d}t = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1}|S(i,f_n)|. \tag{13}$$

其中：$|S(i,f_n)|$ 为模矩阵的某列，$\mathrm{Sum}(i)$ 为第 i 个采样点的所有频率对应的幅值之和. 其定位效果如图 2 所示.

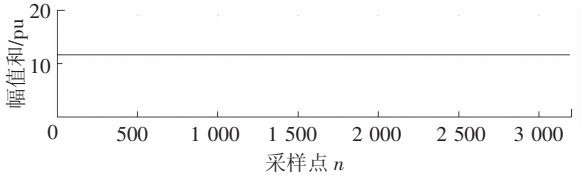


（a）无噪声标准电能质量信号及其 HS 变换结果

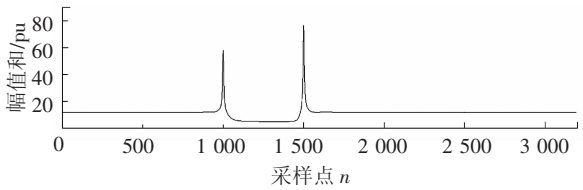


（b）无噪声电压暂降信号及其 HS 变换结果

图 1 电压暂降信号及其 HS 变换结果



（a）无噪声标准信号幅值和曲线

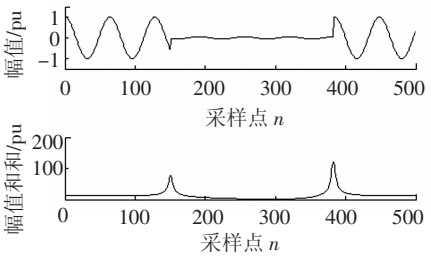


（b）无噪声电压暂降信号幅值和曲线

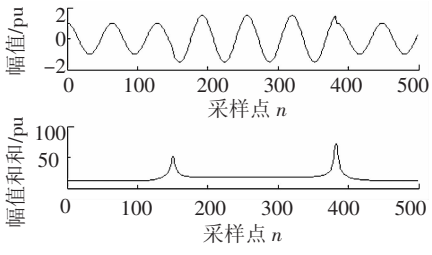
图 2 采用幅值和检测扰动

观察图 2 可知，在电压暂降的发生与结束时刻，幅值和出现明显尖峰；而标准信号幅值和曲线接近直线，无尖峰. 同理，采用相同方法分别定位无噪声干扰的电压中断信号、电压暂升、电磁脉冲、振荡暂态、电压尖峰、电压切痕，其检测定位效果如图 3 所示.

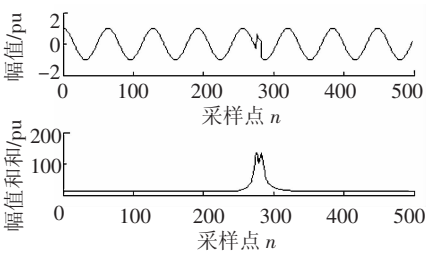
观察图 2、3 可知，无噪声干扰时，扰动信号的 HS 变换模矩阵列幅值和曲线在扰动开始和结束时刻均有明显的尖峰，可以用于检测定位暂态扰动. 考虑总体精度，图 3、4 算例采样频率为 3.2 kHz，电压暂降发生在 1 000 至1 500采样点之间，电压下跌幅度 0.6 pu.



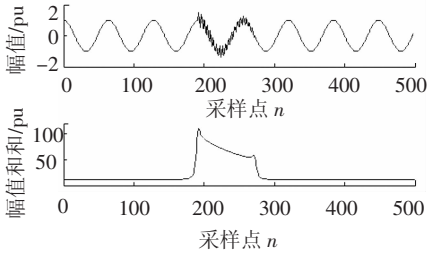
(a) 电压中断定位



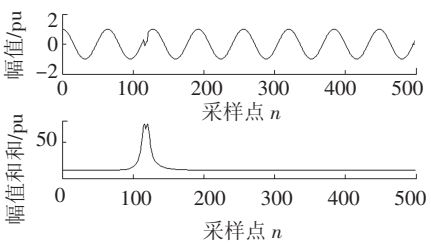
(b) 电压暂升定位



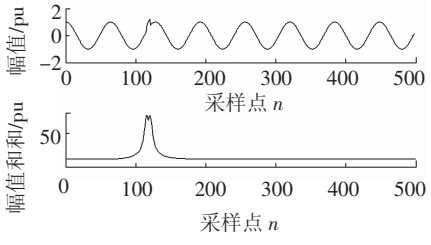
(c) 电磁脉冲 HS 变换定位



(d) 振荡暂态 HS 变换定位



(e) 电压切痕 HS 变换定位



(f) 电压尖峰 HS 变换定位

图 3　电压扰动的 HS 变换定位

3　基于 HS 变换的定位方法定位能力分析

3.1　定位方法设计

暂态定位研究具有其特殊性，需要用精确的实际起、止时间与算法检测结论比较以验证算法性能. 由于实测信号不能精确确定暂态扰动的起、止精确时间，所以无法对新方法的定位精度作出衡量. 本文采用国际通用方法[1-7]，以仿真信号进行实验分析，暂态数学模型参考文献[1，19－20]. 为统一表示，以 A 为标准电压幅值，本文取标幺(1 pu)，f 为电能质量信号基频(50 Hz)，$u(t)$ 为单位阶跃函数，k 为幅值畸变度，α 为振荡最大幅度，c 为振荡衰减系数. 仿真实验样本采样率为 5 kHz. 针对电压切痕与电压尖峰仅考虑每个样本出现 1 次切痕或者尖峰的情况，不考虑样本内周期性出现尖峰或切痕的情况. 采样间隔设为 0.2 ms，即每周期采样 100 个数据点. 以添加白噪声后信噪比为 35 dB 的无扰动信号为例，其 HS 变换分析结果如图 4 所示.

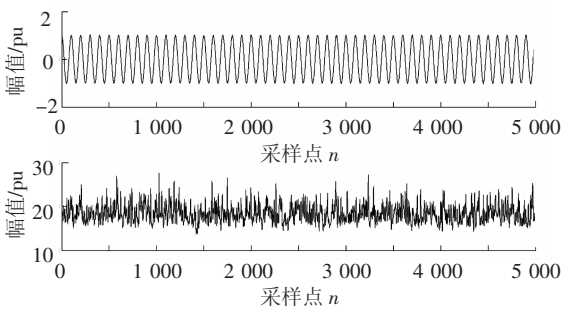


图 4　信噪比为 35 dB 无扰动信号幅值和检测结果

由图 4 第 2 部分可知，当信号含有白噪声但不含扰动时，幅值和曲线分布较均匀，无明显尖峰. 考虑到噪声影响，对扰动信号的幅值和曲线作阈值处理. 观察图 2、4 中幅值和曲线可以发现，除暂态震动外，各种扰动只有扰动持续时间和扰动幅值畸变程度不同，扰动起止时间对应明显尖峰，且峰值较接近. 但暂态振荡受到更多因素影响，如衰减系数、振荡频率等，其起始点为幅值和曲线极大值点，结束时刻对应幅值和曲线最后一个尖峰的峰值点，且起止点对应的幅值和相差较大. 因此，除振荡暂态外，扰动可以根据幅值和曲线的极

大值和平均值来确定阈值;振荡暂态信号由于结束点幅值和远小于开始点,所以仅仅使用幅值和均值来确定阈值.

设振荡暂态阈值为 T_0,设其余扰动阈值为 T_1,由 HS 模矩阵获得的幅值和均值对应向量为 $\mathrm{Sum}(i)$,$i = 1,2,\cdots,N$,N 为扰动样本点采样总数,则阈值计算式为

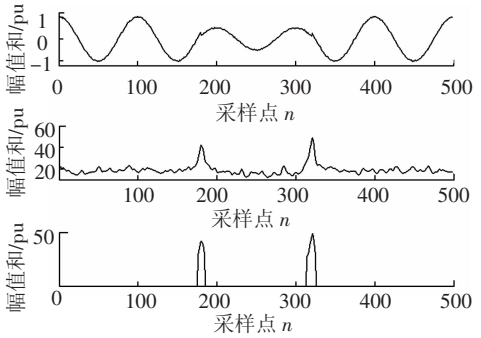
$$T_0 = 1.5 \times \mathrm{mean}(\mathrm{Sum}(i)). \tag{14}$$

$$T_1 = \mathrm{mean}(\mathrm{Sum}(i)) + 0.5 \times (\max(\mathrm{Sum}(i)) - \mathrm{mean}(\mathrm{Sum}(i))) = 0.5 \times (\max(\mathrm{Sum}(i)) + \mathrm{mean}(\mathrm{Sum}(i))). \tag{15}$$

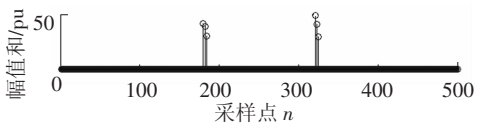
其中:$\max(\mathrm{Sum}(i))$ 为 $\mathrm{Sum}(i)$ 的极大值,$\mathrm{mean}(\mathrm{Sum}(i))$ 为 $\mathrm{Sum}(i)$ 的均值.

取得阈值后将 $\mathrm{Sum}(k)$ 值小于 T_0 的点的幅值取 0. 阈值选择后的结果如图 5(a)所示. 图 5(a)仍然存在较多非零点,需要进一步定位. 观察可知,前后两个尖峰的峰值点对应扰动起止时刻,所以可通过选择峰值点进一步定位. 设经过阈值选择后得到的幅值和向量为 $\mathrm{Sum}'(j)$. 进一步寻找 $\mathrm{Sum}'(j)$ 中的峰值点进行定位,处理结果如图 5(b)所示. 其中非零点均为峰值点,经过峰值点处理后的向量设为 $P(n)$.

由图 5(b)可知,取前后两组非零点中具有最大幅值的峰值点对应的采样时间作为暂态扰动的起止时间. 图 6 为其余 6 种暂态扰动的检测结果.



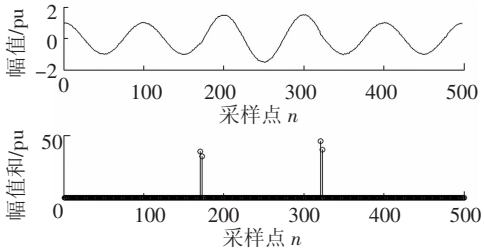
(a) 电压暂降检测阈值处理



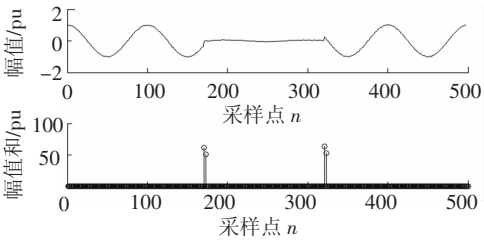
(b) 峰值点

图 5 电压暂降检测分析过程

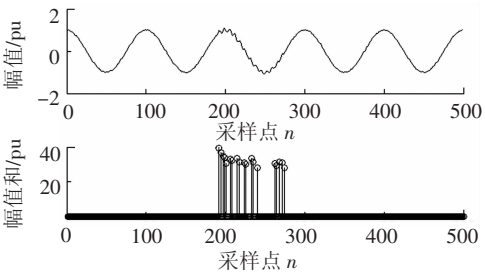
观察图 5、6 可知,电压暂降、中断、暂升的模矩阵各列的幅值和经阈值处理后得到的曲线相似,前后两部分非零点的极值分别对应扰动的起、止时刻;电磁脉冲与电压切痕处理结果类似,非零点中最大幅值两点分别对应扰动起止时刻;振荡暂态的处理结果中,其最大值点为扰动起始时刻,扰动结束时刻对应最后一个非零点峰值点. 设扰动开始时间为 t_s,结束时间为 t_e,设计起止点定位方法如下.



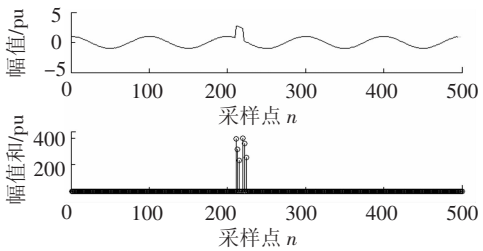
(a)电压暂升检测结果



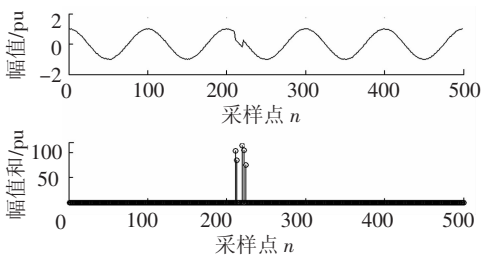
(b) 电压中断检测结果



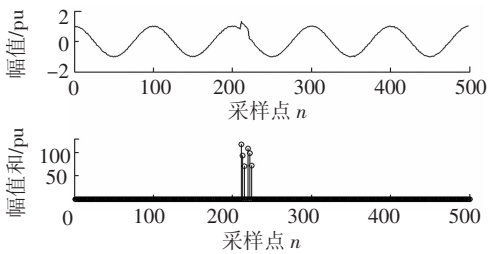
(c) 震荡暂态检测结果



(d) 电磁脉冲检测结果



(e) 电压切痕检测结果



(f) 电压尖峰检测结果

图 6 不同种类扰动检测结果

定位方法 1：如扰动类型为暂态振荡，则 $t_s = \max(P(n))$，针对 $P(n)$ 中的非零点再次寻找峰值点，t_e 为其中最后一个峰值点对应时刻.

定位方法 2：如扰动类型非暂态振荡，则取 $P(n)$ 的第 1 个非零点对应时间 t_{ps} 与最后一个非零点对应时间 t_{pe}. 则 t_s 为 t_{ps} 至 $(t_{ps}+t_{pe})/2$ 间极大值点对应时间；t_e 为 $(t_{ps}+t_{pe})/2$ 至 t_{pe} 间极大值点对应时间.

图 5、6 的定位结果与误差如表 1 所示. 因为所用的样本的采样率为 5 kHz，所以最小误差为 0.2 ms. 如果进一步提高采样率，可以获得更高的定位精度. 由表 2 可知，在信噪比为 35 dB 噪声环境下，新方法可以准确定位图 5、6 所用算例的扰动起止时间.

3.2　不同参数扰动采用新方法定位能力分析

分别检测 7 种扰动在幅值畸变程度不同时的检测结果. 信号信噪比为 35 dB 时仿真实验结果如表 2 所示. 由表 2 可知，当幅值畸变度较小时，信号起止点容易被噪声淹没，无法进行有效检测，当幅值畸变度较高时，新方法可以准确检测、定位各种扰动的起止时刻.

表 1　扰动起止时刻检测结果

扰动类型	扰动起始时刻/ms			扰动结束时刻/ms		
	实际值	检测值	误差	实际值	检测值	误差
电压暂降	36.0	36.0	0	64.0	64.2	0.2
电压中断	36.0	36.0	0	64.0	64.2	0.2
电压暂升	36.0	36.0	0	64.0	64.0	0
振荡暂态	38.4	38.4	0	54.4	54.4	0
电磁脉冲	42.2	42.2	0	44.0	44.0	0
电压切痕	23.2	23.2	0	24.0	24.0	0

表 2　不同畸变幅值扰动起止时刻检测结果

扰动类型	幅值畸变度 k	起始定位误差/ms	终止定位误差/ms
电压中断	0.9	0	0.2
	1.0	0	0.2
电压暂降	0.8	0.2	0.2
	0.5	0.2	0.2
	0.1	方法失效	方法失效
电压暂升	0.8	0.2	0.2
	0.5	0	0.2
	0.1	方法失效	方法失效
电磁脉冲	3	0	0
	2	0	0
	1	0	0
振荡暂态	0.8	0	0
	0.5	0	0
	0.1	0	3.0
电压切痕	0.9	0	0
	0.5	0	0
	0.1	0	0.2
电压尖峰	0.9	0	0
	0.5	0	0
	0.1	方法失效	方法失效

除信噪比外，其他参数不变，检测 7 种扰动在信噪比分别为 50、40、30 dB 情况下的定位精度，定位误差结果如表 3 所示.

表 3　不同信噪比扰动信号起止时刻检测结果

暂态信号	幅值畸变度 k	信噪比	起始定位误差/ms	终止定位误差/ms
电压中断	1	50	0.2	0.2
		40	0.2	0.2
		30	0.2	0.2
电压暂降	0.6	50	0.2	0.2
		40	0.2	0.2
		30	0.2	0.2
电压暂升	0.5	50	0.2	0.2
		40	0.2	0.2
		30	0	1.6
电磁脉冲	2	50	0	0
		40	0	0
		30	0	0
振荡暂态	0.5	50	0	0
		40	0	0
		30	0	0
电压切痕	0.5	50	0	0
		40	0	0
		30	0	0
电压尖峰	0.5	50	0	0
		40	0	0
		30	0	0

综合以上实验可知：1）新算法在 30 dB 以上噪声环境中，可以较准确地定位扰动起止时刻，但是随着噪声增大定位准确率下降；2）当扰动幅值畸变度较小（如 $k = 0.1$ pu）、暂态信号信噪比较高时定位准确，但随着噪声增强新方法检测精度下降或者失效.

除噪声与幅值畸变程度之外，扰动模型还包

括扰动持续时间、振荡频率、振荡衰减系数等参数. 通过改变不同扰动参数进行实验,发现扰动持续时间、振荡频率对检测结果影响不明显,振荡衰减系数对检测结果影响显著. 以添加白噪声后信噪比为30 dB,具有不同振荡衰减系数的暂态振荡信号为例进行实验,结果如表4所示.

表4　不同参数暂态振荡起止时刻检测结果

最大振荡幅度	振荡衰减系数	起始定位误差/ms	终止定位误差/ms
25	0.5	0	0
75	0.5	0	0
125	0.5	0	0
125	0.8	0	0
125	0.4	0	0.8
125	0.1	0	方法失效

由表4可知,当衰减系数较大,且最大振荡幅值较小时,新方法误差较大,且易失效. 因为衰减系数实际作用仍然是随时间逐渐减小振荡幅度,所以可知衰减系数较大时,结束时间点检测精度下降.

综合以上实验发现:1) 扰动持续时间与振荡频率变化对定位精度无影响;2) 随着振荡衰减系数的增大,振荡暂态的结束时间点检测精度下降或检测失效.

4　结　论

1)对基于HS变换模矩阵频率幅值和的自动定位方法进行仿真研究,发现通过阈值处理与极大值点选择可以有效滤除噪声信号影响. 新方法可以有效定位7种暂态扰动,且受信号参数影响较小,具有一定的抗噪性. 当噪声较强时,畸变程度较小的扰动特征容易被噪声淹没,导致信号的检测失效.

2)考虑新方法未对电能质量信号作专门的降噪处理,未来如将该方法与现有的优秀电能质量信号降噪方法相结合,可以获得更高的抗噪性,可进一步提高新方法的检测能力与适应性.

参考文献

[1] 赵静,何正友,钱清泉. 利用广义形态滤波与差分熵的电能质量扰动检测[J]. 中国电机工程学报,2009,29(7):121－127.

[2] 曾纪勇,丁洪发,段献忠. 基于数学形态学的谐波检测与电能质量扰动定位方法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(21):57－61.

[3] 赵凤展,杨仁刚. 基于短时傅里叶变换的电压暂降扰动检测[J]. 中国电机工程学报,2007,27(10):28－34,109.

[4] 鲁波涌,黄文清. 结合小波变换和能量算子的电压暂降检测方法[J]. 电工技术学报,2011,26(5):171－177.

[5] 赵静,何正友,贾勇,等. 利用形态非抽样小波的电能质量定位方法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(31):109－114.

[6] 李天云,赵研,李楠,等. 基于HHT的电能质量检测新方法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(17):52－56.

[7] 全惠敏,戴瑜兴. 基于S变换模矩阵的电能质量扰动信号检测与定位[J]. 电工技术学报,2007,22(8):119－125.

[8] 朱艳伟,石新春,李鹏. 多分辨率奇异谱熵和支持向量机在孤岛与扰动识别中的应用[J]. 中国电机工程学报,2011,31(7):64－70.

[9] 蔡明,唐昆明,张太勤. 基于参数辨识方法的谐波源定位[J]. 电网技术,2011,35(6):134－138.

[10] 舒泓,王毅. 基于数学形态滤波和Hilbert变换的电压闪变测量[J]. 中国电机工程学报,2008,28(1):111－114.

[11] XIAO X, XU F, YANG H. Short duration disturbance classifying based on S-transform maximum similarity [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2009, 31(7/8):374－378.

[12] SAMANTARAY S R, DASH P K, PANDA G. Fault classification and location using HS-transform and radial basis function neural network [J]. Electric Power Systems Research, 2006, 76(9/10):897－905.

[13] 李立,易吉良,朱建林. 采用改进不完全S变换估计电能质量扰动参数[J]. 电工技术学报,2011,26(6):187－193.

[14] 陈学华,贺振华,黄德济. 广义S变换及其时频滤波[J]. 信号处理,2008,24(1):28－31.

[15] PINNEGAR C R, MANSINHA L. The S-transform with windows of arbitrary and varying shape[J]. Geophysics, 2003, 68(1):381－385.

[16] BISWAL B, DASH P K, PANIGRAHI B K. Non-stationary power signal processing for pattern recognition using HS-transform[J]. Applied Soft Computing, 2009, 9(1):107－117.

[17] BISWAL B, DASH P K, PANIGRAHI B K. Power quality disturbance classification using fuzzy C-means algorithm and adaptive particle swarm optimization[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2009, 56(1):212－220.

[18] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: the S transform [J]. IEEE Trans on Signal Process, 1996, 44(4):998－1001.

[19] AMEEN M G, NESIMI E, WEN L S. Automatic classification and characterization of power quality events [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(4):2417－2425.

[20] UYAR M, YILDIRIM S, GENCOGLU M T. An expert system based on S-transform and neural network for automatic classification of power quality disturbances [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3):5962－5975.

(编辑　魏希柱)