

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 5 月 7 日 (07.05.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/087752 A1

- (51) 国际专利分类号:
H02S 50/00 (2014.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2018/125440
- (22) 国际申请日: 2018 年 12 月 29 日 (29.12.2018)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201811269779.1 2018 年 10 月 29 日 (29.10.2018) CN
- (71) 申请人: 西安交通大学 (XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国陕西省西安市咸宁西路 28 号, Shaanxi 710049 (CN)。
- (72) 发明人: 李兴文 (LI, Xingwen); 中国陕西省西安市咸宁西路 28 号, Shaanxi 710049 (CN)。

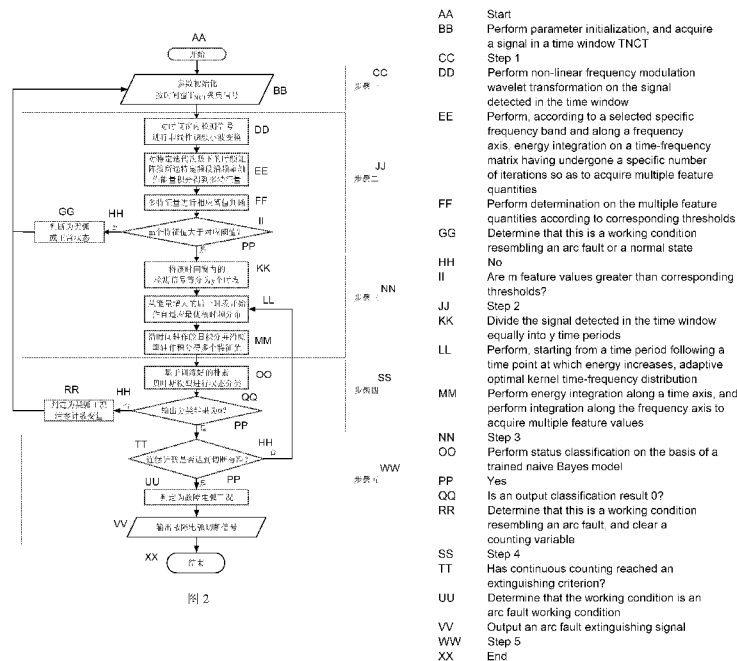
陈思磊 (CHEN, Silei); 中国陕西省西安市咸宁西路 28 号, Shaanxi 710049 (CN)。 孟羽 (MENG, Yu); 中国陕西省西安市咸宁西路 28 号, Shaanxi 710049 (CN)。

(74) 代理人: 西安通大专利代理有限公司 (XI'AN TONG DA PATENT AGENCY CO., LTD.); 中国陕西省西安市咸宁西路 28 号, Shaanxi 710049 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,

(54) Title: PHOTOVOLTAIC SYSTEM ARC FAULT DETECTION METHOD EMPLOYING ADAPTIVE KERNEL FUNCTION AND INSTANTANEOUS FREQUENCY ESTIMATION

(54) 发明名称: 基于自适应核函数和瞬时频率估计的光伏系统故障电弧检测方法



(57) Abstract: A photovoltaic system arc fault detection method employing an adaptive kernel function and instantaneous frequency estimation comprises: acquiring a signal x_t in a time window having a length T_{NCT} ; performing non-linear frequency modulation wavelet transformation to acquire an iterative time-frequency graph of x_t ; performing feature quantity construction on the basis of a frequency component in the selected iterative time-frequency

MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

graph to determine a time point when spectral energy increases; upon detecting a sudden-change point at which energy increases, performing adaptive optimal kernel time-frequency distribution to acquire a matrix distribution form of x_t in a time-frequency domain; calculating, in the time dimension, the sum of squares of the matrix to acquire a column vector; selecting multiple frequency bands, performing, in the frequency dimension, an integration operation on each frequency band to acquire multiple feature values, and inputting the feature values to a trained naive Bayes model; and determining a status of a photovoltaic system in a current time period. The method uses multiple effective time-frequency features to accurately identify an arc fault in a photovoltaic system, and prevents misoperation in a variety of working conditions resembling arc faults, enabling the photovoltaic system to operate safely and stably.

(57) 摘要: 一种基于自适应核函数和瞬时频率估计的光伏系统故障电弧检测方法: 以 T_{NCT} 长度的时间窗采集信号 x_t , 经过非线性调频小波变换得到 x_t 的迭代时频图, 基于所选迭代时频图内的频率分量构造特征量, 用以判断频谱能量增大的时刻; 在发现存在能量增大的突变点后, 经过自适应最优核时频分布得到 x_t 在时频域内对应的矩阵分布形式, 对该矩阵按时间维度求平方和得列向量, 选定多个频段, 对每个频段进行频率维度的积分运算, 得到多个特征值输入至训练好的朴素贝叶斯模型, 判断当前时段内的光伏系统状态。通过多个有效的时频特征准确辨识光伏系统内故障电弧的同时还能确保多种类弧工况下不误动, 使光伏系统安全稳定运行。

基于自适应核函数和瞬时频率估计的光伏系统故障电弧检测方法

技术领域

本发明属于光伏系统电气故障检测领域,具体涉及一种基于非线性调频小波变换寻找
5 频谱能量增大的时刻,并将基于自适应最优核时频分布得到的多个时频特征输入至朴素贝叶斯模型,以判断光伏系统运行状态的方法,由此确保多种类弧工况干扰情况下也能准确判断故障电弧,从而可以熄灭相应故障电弧,保障光伏系统的安全运行。

背景技术

目前电力电子半导体技术的发展令直流变压可通过直流变换器实现,占比越来越高的
10 广义直流负荷通过直流变换器可连接至非水可再生发电系统。这种直流微型电网架构可通过减少变换环节降低供电系统运营成本、提升系统供电效率。对于典型非水可再生发电系统之一的太阳能光伏发电系统而言,一旦系统内出现线路绝缘老化、线路破损或者连接松动等现象,所引发的故障电弧现象会引起火灾事故,威胁着系统供电和人身用电安全。

目前,光伏系统故障电弧的特征捕获往往利用其电特性。然而,光伏系统在日出时必
15 然会经历启动过程,在运行时也必然会经历直流负载的正常投切过程,这些正常的系统暂态过渡过程也会对采集的系统电量信号产生影响,形成与故障电弧相同的时域形态,这些工况统称为类弧。类弧工况会形成一些与故障电弧相似的特征表达,干扰着故障电弧的正确判断,会引发故障电弧检测装置的误动,对光伏系统造成频繁的不必要停机状态,严重影响着系统供电稳定性,大幅降低了光伏系统的运行效率。

20 现阶段应用于光伏系统的故障电弧保护产品尚未成熟,对其故障电弧特性的研究也处于起步阶段,研究如何有效区分故障电弧与类弧对故障电弧特性的理论研究有着至关重要的价值。因此,研究光伏系统故障电弧的独特特征,基于这些独有的故障电弧特性构建完备的故障电弧检测算法,使之在类弧扰动的情形下还能准确、可靠、快速地辨识故障电弧,对光伏系统可靠供电和维护用电安全有着极其重要的意义。

25 发明内容

本发明的目的在于提供一种基于自适应核函数和瞬时频率估计的光伏系统故障电弧检测方法,解决光伏系统内存在类弧干扰的情况下准确、可靠、快速辨识故障电弧的问题。

为达到上述目的,本发明采用了以下技术方案:

1) 对光伏系统内的电流信号,以 T_{NCT} 为时间窗长度进行逐点采样,得到检测信号
30 x_t , 转至步骤 2);

2) 对检测信号 x_t 作非线性调频小波变换, 得到检测信号 x_t 多次迭代的复数时频矩阵, 通过选定 u 个迭代复数时频矩阵, 以及对选定的迭代复数时频矩阵中指定频率分量处元素的模进行频率维度 (频率轴方向) 的平方和运算, 构造 n 个特征量 $NC_i(t)$, $i=1,2,3\cdots,n$ (n 表示所构造的特征量总数), 并形成 $n \times T_{NCT}$ 的二维矩阵 $\mathbf{M}$, 将 $\mathbf{M}$ 沿时间维度 (时间轴方向) 求取后一时刻 (后一列) 相对前一时刻 (前一列) 的特征量变化, 并与阈值列向量 $\mathbf{Y}$ 进行相应元素比较, 若该时间窗内某采样时刻 (不含时间窗内第一个时刻) 对应的特征量变化的值大于相应阈值的个数超过 m 个, 则判断该时间窗的电流信号存在频谱能量增大, 将检测信号 x_t 等分为 y 个时段, 转至步骤 3) 作进一步的判断; 否则, 判断该采样时刻光伏系统处于正常工作状态, 继续进行下一采样时刻的对应特征量变化的比较, 直至根据该时间窗的检测信号均判断为光伏系统处于正常工作状态时, 返回步骤 1) 开始进行下一时间窗的检测信号采集与判断;

3) 从频谱能量增大时刻所在时段的下一时段开始作自适应最优核时频分布, 得到在时频域内对应的复数时频矩阵, 选定频率维度上 r 个有效的频段, 对相应元素的实部进行时间维度的平方和运算得相应列向量, 然后对选定的每个频段进行频率维度的积分运算, 构造得到 r 个特征量作为输入向量, 转至步骤 4);

4) 利用训练好的朴素贝叶斯模型及对应的 r 个特征量的值对该输入向量进行状态分类, 若输出值为 0, 则判定该时段呈现故障电弧状态, 转至步骤 5); 若输出值为 1, 则判定是类弧干扰, 清零计数变量, 返回步骤 1) 开始进行下一时间窗的检测信号采集与判断;

5) 对经所述朴素贝叶斯模型进行状态分类计算所得的输出值为 0 的时段个数利用计数变量进行计数, 当输出值为 0 的时段个数达到 p 个时, 则判断光伏系统发生故障电弧, 发出电路开断的控制信号以熄灭故障电弧, 否则继续按照步骤 3) 进行下一时段的检测信号分析。

优选的, 所述电流信号为由霍尔传感器采样并经高通滤波后的信号或者为直接由电流互感器采样的信号。

优选的, 所述时间窗长度 T_{NCT} 的选取原则为确定长度的时间窗内检测信号能反映出有效的故障电弧时频特征, T_{NCT} 的取值范围为 4~40ms; 所划分时段数 y 的取值范围为 2~10。

优选的, 所述步骤 2) 及步骤 3) 中, 多时频变换的各项参数基于最大程度地分离故障电弧区别于类弧工况的显著时频特征而定; 其中, 非线性调频小波变换所选用的多项式

阶次的取值范围为 10~30；迭代终止条件为迭代达到既定次数即停止，迭代次数的取值范围为 3~8；自适应最优核时频分布的输出频率划分尺度的取值范围为 256~8192。

优选的，所述非线性调频小波变换的有效迭代次数（即 u ）和频率分量的选取原则为能以脉冲形式准确指示故障电弧发生时刻所在的时间窗，以较大的幅值形式显示故障电弧状态与类弧状态的差异且该差异具有一致性；有效迭代次数 u 的取值范围为 2~5；所述频率分量根据故障电弧特征频段进行指定，不同迭代次数上选定的故障电弧特征频段个数相同或不同，故障电弧特征频段均在 5~50kHz 的范围内选定，不同迭代次数所选定的故障电弧特征频段部分重叠或连续分割或存在间隔；根据有效迭代次数及频段分量所构造的特征量总数 n 的取值范围为 5~10。

优选的，对于非线性调频小波变换构造的 n 个特征量 $NC_i(t)$ 采用阈值判断处理方式，所述阈值列向量 $\mathbf{Y}$ 中的阈值设定原则为能够获取信号在各特征量层面上的幅值变化模式，不同特征量 $NC_i(t)$ 对应设定的阈值相同或不同，用于判断当前采样时刻下频谱能量是否增大的阈值个数 m 的取值范围为 $n-2 \sim n$ 。

优选的，所述自适应最优核时频分布完成后，对频率维度上有效的 r 个频段进行选取的原则为能以脉冲形式准确指示故障电弧发生所在的时间窗，以较大的幅值形式显示故障电弧状态与类弧状态的差异且该差异具有一致性； r 个频段根据故障电弧特征频段选定，故障电弧特征频段在 (0, 50] kHz 的范围进行选定，所选定的故障电弧特征频段部分重叠或连续分割或存在间隔；所构造的对应特征量总数 r 的取值范围为 3~7。

优选的，所述朴素贝叶斯模型在学习训练过程中的输出状态标记方式为：对应时段内的电弧电压为零，则标记为 1，对应时段内的电弧电压非零，则标记为 0；训练样本容量的取值范围为 1500~3000。

优选的，所述 p 为故障电弧触发阈值，选取原则为以快速切除故障电弧、不误动地区分类弧工况而定，取值范围为 18~120。

本发明具有如下有益的技术效果：

1) 本发明中的非线性调频小波变换使计算结果更精确，可更为准确地描述信号中复杂频率的变化规律，对故障电弧的时频能量集中度好，能较线性时频变换获得更好的故障电弧时频特征聚集性，提升了故障电弧特征的抗噪声干扰能力；

2) 本发明中的自适应时频分析对信号自相关函数进行截取，细致刻画了信号的细节部分，使得信号时频分辨率之间不存在相互制约关系，获得了较好的时频局部化结果，达到了算法分析所需的时频分布精度要求，有利于发现故障电弧区别于类弧的独特特征，该

分析方法折中控制了交叉项的抑制与自项的衰减,解决了时频分辨率提升时引发的交叉项干扰问题;

3) 本发明对检测信号提取了多重特征量,通过非线性调频小波变换的特征量组筛选正常状态和大部分类弧状态,只有故障电弧状态和少部分类弧状态才需要进行自适应时频分析和朴素贝叶斯模型的计算,非线性调频小波变换和自适应时频分析需要存储的中间矩阵极少,相应的特征量均可采用实时计算替换模式,大幅减少了检测算法所需消耗的内存,降低了故障电弧检测对硬件的依赖;

4) 本发明在非线性调频小波变换及其特征量计算时,每次采用较宽的时间窗对正常状态电流信号进行运算,变换本身的精细时间尺度有利于定位故障电弧发生时刻,在检测到疑似故障电弧发生时刻后,采用较窄宽的分析时段对该状态电流信号进行运算,非线性调频小波变换和自适应时频分析的交错计算时序切实提升了检测算法的计算速度,满足了故障电弧检测的快速性要求;

5) 本发明在非线性调频小波变换和自适应时频分析的每个层级均提出多个特征量构成的特征量组,在可能造成某个特征量失效的情况下,特征量组内的其他特征量仍能确保系统状态的有效判断,两个层级之间的相互配合可大幅提升故障电弧或类弧工况分类的准确性,满足了故障电弧检测的可靠性要求。

进一步的,本发明充分利用非线性调频小波变换和自适应时频分析的优势,提炼各自的最优时频特征,所构建的检测算法能在防范系统类弧干扰的情况下可靠、准确、快速地动作故障电弧,确保准确区分故障电弧和由负载投切、系统启动等因素引发的类弧工况,在保障安全用电的同时充分保障了光伏系统的供电稳定性。

附图说明

图 1 为本发明实施例中的光伏系统故障电弧检测算法的硬件实现原理框架图。

图 2 为本发明实施例中的光伏系统故障电弧检测算法流程图。

图 3a 为故障电弧的电流信号。

图 3b、图 3c、图 3d、图 3e、图 3f、图 3g 分别为应用非线性调频小波变换进行光伏系统故障电弧检测的特征量波形,各特征量所采用的频段选为 NC_1 : 第二次迭代所得时频图内的 8.3kHz~12.4kHz; NC_2 : 第二次迭代所得时频图内的 12.5kHz~16.6kHz; NC_3 : 第二次迭代所得时频图内的 29.2kHz~33.3kHz; NC_4 : 第三次迭代所得时频图内的 8.3kHz~12.4kHz; NC_5 : 第三次迭代所得时频图内的 25kHz~29.1kHz; NC_6 : 第三次迭代所得时频图内的 29.2kHz~33.3kHz。

图 3h、图 3i、图 3j、图 3k、图 3l 分别为应用自适应最优核时频分布进行光伏系统故障电弧检测的特征量波形，各特征量所采用的频段选为 AOK_1 : 24.4kHz~30.4kHz; AOK_2 : 18.3kHz~24.3kHz; AOK_3 : 12.2kHz~18.2kHz; AOK_4 : 6.1kHz~12.1kHz; AOK_5 : 0.1~6.0kHz。

图 3m 为应用本发明进行光伏系统故障电弧检测的系统状态判断输出信号（针对图 3a）。

图 4a 为负载投切的类弧电流信号。

图 4b、图 4c、图 4d、图 4e、图 4f、图 4g 分别为应用非线性调频小波变换进行光伏系统故障电弧检测的特征量波形，各特征量所采用的频段分别选为 NC_1 、 NC_2 、 NC_3 、 NC_4 、 NC_5 、 NC_6 。

图 4h 为应用本发明进行光伏系统故障电弧检测的系统状态判断输出信号（针对图 4a）。

图 5a 为系统启动的类弧电流信号。

图 5b、图 5c、图 5d、图 5e、图 5f、图 5g 分别为应用非线性调频小波变换进行光伏系统故障电弧检测的特征量波形，各特征量所采用的频段分别选为 NC_1 、 NC_2 、 NC_3 、 NC_4 、 NC_5 、 NC_6 。

图 5h、图 5i、图 5j、图 5k、图 5l 分别为应用自适应最优核时频分布进行光伏系统故障电弧检测的特征量波形，各特征量所采用的频段选为 AOK_1 、 AOK_2 、 AOK_3 、 AOK_4 、 AOK_5 。

图 5m 为应用本发明进行光伏系统故障电弧检测的系统状态判断输出信号（针对图 5a）。

具体实施方式

下面结合附图和实施例对本发明进行详细说明。

（一）本发明提出的光伏系统故障电弧检测算法的硬件实现

首先对不同类弧工况和故障电弧工况下的光伏系统电流信号按时间窗采样，若所述电流信号为霍尔传感器采集得到，经高通滤波（滤波的目的是去除直流分量）后进行后续的特征层处理；若所述电流信号为电流互感器采集得到，则直接进行后续的特征层处理。所述霍尔传感器或电流互感器安装在所需监测的光伏串内或光伏阵列汇流直流母线上，亦可共用逆变器进行系统电流采集的装置。如图 1 所示，采集到的电流信号输入至直流故障电弧检测装置，经高通滤波、A/D 转换模块输入至 DSP 处理模块，在 DSP 模块处理过程中，电流信号经过基于非线性调频小波变换的多特征量处理得到对应的二维矩阵 $\mathbf{M}$ ，用以判

断频谱能量增大的时刻。在发现存在能量增大的突变点后，对当前时间窗长度下的电流信号进行更为精细尺度的划分，形成多个时段，从能量增大的下一时段开始作自适应最优核时频分布，得到相应的多特征值作为朴素贝叶斯模型的输入向量。

155 利用电流信号对应的电弧电压信号这一先验知识在输入向量最后一行附加类别标记，生成朴素贝叶斯模型的训练学习样本，在朴素贝叶斯模型学习完毕，并测试训练所得模型进行状态分类的准确率后，便可对输入时间窗内的电流采样信号提取到多个基于自适应最优核时频分布的时频特征，输入至训练好的朴素贝叶斯模型中进行状态判断。朴素贝叶斯模型可实时输出光伏系统内是否发生故障电弧的 0/1 判定结果，发生故障电弧时输出 0，判断系统正常运行时输出 1。只有在朴素贝叶斯模型连续输出 0 到达指定时段个数时，才
160 进行故障电弧切除信号的触发，即经 DSP 处理模块输出的控制信号经 D/A 转换模块驱动继电器动作，控制光伏系统相应支路处的断路器进行切断动作；在朴素贝叶斯模型未达到既定输出 0 的周期数前，只要其有一个 1 输出，则认为此时是类弧工况的干扰引发而不是真正的故障电弧工况。

（二）本发明提出的光伏系统故障电弧检测算法流程

165 以 T_{NCT} 长度的时间窗采集信号 x_t ，经过非线性调频小波变换得到 x_t 的迭代时频图，基于所选迭代时频图内的频率分量构造特征量，用以判断频谱能量增大的时刻；在发现存在能量增大的突变点（能量增大的时刻）后，经过自适应最优核时频分布得到 x_t 在时频域内对应的矩阵分布形式，对该矩阵按行（时间维度）求平方和得列向量，选定多个频段，对每个频段进行频率维度的积分运算，得到多个特征值输入至训练好的朴素贝叶斯模型，
170 便可判断当前时段内的光伏系统状态。本发明通过多个有效的时频特征准确辨识光伏系统内故障电弧的同时，还能确保多种类弧工况下不误动，由此提升了光伏系统安全稳定运行的能力。

该光伏系统故障电弧检测算法的核心为基于自适应核函数和瞬时频率估计的光伏系统故障电弧检测方法，算法的具体步骤如下（图 2）：

175 步骤一、参数初始化过程包括时间窗长度 T_{NCT} 、阈值列向量 Y 、 m （频谱能量增大触发阈值）、故障电弧触发阈值 p ，以及非线性调频小波变换及自适应最优核时频分布两种时频分析工具内的各项参数（非线性调频小波变换所选用的多项式阶次，迭代次数、自适应最优核时频分布的输出频率划分尺度）等。

光伏系统运行中，以设定的时间窗长度 T_{NCT} 对电流信号进行采集。这里的电流信号
180 是采用霍尔传感器检测并经高通滤波后的信号或者由电流互感器等所测不含直流分量的

信号。考虑非线性调频小波变换所得的时间、频率分辨率之间的相互约束关系，若时间窗取的过短，会导致非线性调频小波变换所得二维复数时频矩阵的频率划分精度不够，无法反应故障电弧差异于类弧的根本特征；若时间窗取的过长，则加重了所述算法对检测装置硬件在内存和主频上的要求。因此，所述时间窗长度 T_{NCT} 的取值范围为 4~40ms。

185 步骤二、采用非线性调频小波变换的方法对第 t 个时间窗下采集的电流检测信号 x_t 进行分析，得到该时间窗下光伏系统输出电流信号多次迭代后的复数矩阵时频分布形式。选定 u 个迭代复数时频矩阵，对指定频率分量处元素的模进行频率维度的平方和运算（即对选定迭代次数下的时频矩阵按所选故障电弧特征频段沿频率维度作能量积分），构造 n 个特征量。其中，通过对比正常、类弧与故障电弧状态下的幅值差异，并考虑在保证故障电弧检测可靠性的前提下尽可能减少迭代及频率分量的计算，确定有效迭代次数 u （有效迭代次数等于迭代复数时频矩阵选定个数，是小于或等于迭代终止时的迭代次数的）的取值范围为 2~5。所选择的有效迭代次数上所选定的指定频率分量个数可不同，但均在故障电弧特征频段 5~50kHz 的范围内选定，由各有效迭代次数（ u ）下的频段分量所构造的特征量总数 n 的取值范围为 5~10。

195 这 n 个特征量在该时间窗内形成二维矩阵 $\mathbf{M}$ ，将其沿时间维度与阈值列向量 $\mathbf{Y}$ 进行相应元素比较，若二维矩阵 $\mathbf{M}$ （ $\mathbf{M}$ 为 $n \times T_{NCT}$ 的二维矩阵）对应特征量的值（由于特征值本身较大，故实际选取其相较于前一时刻的对应特征量的值的变化）大于相应阈值的个数超过 m 个，则判断该时间窗的电流信号存在频谱能量增大，转至步骤三作进一步的判断，否则判断该采样时刻处于正常工作状态，继续进行下一采样时刻的对应特征值比较直至该时间窗的检测信号均为光伏系统正常工作状态，返回步骤一继续采样。其中， m 的取值范围为 $n-2 \sim n$ 。

205 步骤三、将电流检测信号 x_t 等分为 y 段（所划分时段 y 的取值范围为 2~10），从能量增大的下一时段开始采用自适应最优核时频分布的方法对 x_t 的对应时段逐段进行分析，得到该时段下光伏系统输出电流信号在时频域内对应的复数矩阵时频分布形式。为尽可能在保证故障电弧检测可靠性的前提下减少计算数量、提高判断效率和速度，对相应元素（即有效的频段）的实部进行时间维度的平方和运算得相应列向量，对每个有效频段进行频率维度的积分运算得到多特征量的值作为输入向量，转至步骤四进行朴素贝叶斯模型识别。

210 其中，自适应最优核时频分布的输出频率划分尺度的取值范围为 256~8192。在构建特征量时考虑故障电弧特征频段均在 (0, 50] kHz 的范围进行选定，根据选定结果确定有效频段，所构造的特征量总数 r 的取值范围为 3~7。

步骤四、利用训练好的朴素贝叶斯模型对该输入向量进行状态分类，若该时段呈现故障电弧状态，则输出值为 0，转至步骤五；否则输出值为 1，判定是类弧干扰，清零计数变量，返回步骤一进行下一时间窗内的检测信号分析。

其中，朴素贝叶斯模型在学习训练过程中的标记：对应时段内的电弧电压信号为零，
215 则标记为 1，对应时段内的电弧电压非零，则标记为 0，训练样本容量的取值范围为 1500~3000。

步骤五、对经朴素贝叶斯模型计算得到的输出值为 0 的时段个数进行计数，当时段个数达到 p 个时，则判断光伏系统内发生故障电弧，发出电路开断的控制信号以熄灭故障电弧，否则，返回步骤三进行下一时段内的检测信号分析。

220 其中，为快速切除故障电弧、不误动地区分类弧工况，所述故障电弧触发阈值 p 的取值范围为 18~120。

在某些类弧工况下，基于非线性调频小波变换所得的特征量在某些时间窗内可能发生阈值误判而失去类弧工况的正常判定能力，而基于自适应最优核时频分布所得的特征量在这些时间窗内的类弧工况则不发生误判，呈现与故障态不同的特征值。朴素贝叶斯模型仍能利用所学习到的故障电弧统计规律较为准确地将类弧工况判定为正常态，由此体现了本
225 发明检测算法关注多重特征量对于提高类弧工况干扰下可靠辨识故障电弧能力的优势。本发明依据提出的多特征量具有较强的故障电弧识别能力，既避免了偶然因素引起直流故障电弧检测装置的误动作，又保证了发出故障电弧支路切断信号的快速性。

（三）上述光伏系统故障电弧检测算法对故障电弧工况的辨识效果

230 如图 3a 所示的光伏系统输出电流检测信号，在 0.6648s 以前，光伏系统处于正常工作状态，0.6648s 系统出现故障电弧，电流信号出现大幅值脉冲，此后一直处于故障电弧状态。

通过非线性调频小波变换对电流信号进行分析，对所得到的时频域内二维复数矩阵内指定频率分量的元素取模，在频率维度上采用积分的处理方式（即平方和运算），构建基
235 于非线性调频小波变换的 6 个特征量（如图 3b~图 3g 所示）。各个特征量均在故障电弧发生时刻有大幅值的脉冲指示，特征值变化大于相应所设定的阈值（对应阈值列向量 $\mathbf{Y}$ 设为[30, 35, 75, 60, 40, 30]），均可判定存在频谱能量增大。由于判断为频谱能量增大的特征量个数大于初始给定阈值（ $M=5$ ），对图 3a 所示故障电弧脉冲后的电流信号进行后续的自适应最优核时频分布及朴素贝叶斯模型分析。

240 通过自适应最优核时频分布对电流信号进行分析,所得到的时频域内二维复数矩阵内相应元素的实部沿时间维度采用平方和运算的处理方式,在频率维度上采用积分的处理方式,得到基于自适应最优核时频分布的 5 个特征量。为了显示正常与故障电弧状态的差异,给出全部时段电流信号的自适应最优核时频分布计算结果,如图 3h~图 3l 所示。其中,各个特征量均在故障电弧发生时刻有短暂、极大幅值的脉冲指示,在故障电弧发生后的特征值较正常工作状态整体变大,这种一致的大幅值状态有利于故障电弧的准确辨识。

245 将上述计算所得的 5 个时频特征值输入至训练好的朴素贝叶斯模型,判断光伏系统内是否存在故障电弧。当朴素贝叶斯模型输出 1 时,则判断该时段内光伏系统处于类弧状态,前述非线性调频小波变换发生了误判,继续进行下一时段内光伏系统输出电流信号的状态检测;当朴素贝叶斯模型输出 0 时,则判断该时段内光伏系统可能发生了故障电弧,还需通过所设定的故障电弧切除标准 (P) 进一步确认故障电弧的发生,即连续输出 0 的周期达到 100 个后,则确定光伏系统内发生了故障电弧,给相应的断路器发出切断故障电弧支路信号。如图 3m 所示的结果,检测算法面对正常工作电流能够给出正确的输出(判断其未达到故障电弧切除标准的要求),对故障态电流信号能够给出正确的输出(判断其达到故障电弧切除标准的要求)。

255 (四)上述光伏系统故障电弧检测算法对光伏系统内多种源于正常操作形成的类弧工况的辨识效果

4.1 对于光伏系统内通过负载切换所形成类弧的辨识效果

如图 4a 所示的光伏系统输出电流检测信号,在 1.093s 以前,光伏系统处于正常工作状态,1.093s 发生负载切换过程,形成时域上类似的电流突变过程。

260 通过非线性调频小波变换对电流信号进行分析,对所得到的时频域内二维复数矩阵内各元素取模,在频率维度上采用积分的处理方式(即平方和运算),构建基于非线性调频小波变换的 6 个特征量如图 4b~图 4g 所示。其中,各个特征量均在系统切换负载时刻幅值显著降低,特征值变化小于 Y 中相应给定阈值,均可判定不存在频谱能量增大。由于判断频谱能量增大的特征量个数小于设定阈值 m,电流信号不进行后续的自适应最优核时频分布及朴素贝叶斯模型分析步骤,如图 4h 所示的结果,阈值 (m) 判定能够给出正确的输出,判断该时间窗内光伏系统处于正常工作状态,继续进行下一时间窗内光伏系统输出电流信号的状态检测。

4.2 对光伏系统内通过系统启动所形成类弧的辨识效果

如图 5a 所示的光伏系统输出电流检测信号，在 2.256s 以前，光伏系统处于正常停机
270 状态，2.256s 时，系统开始启动过程，形成类似于图 4a 的较小时域电流幅值等级，2.586s
时，系统结束启动过程，形成较大的时域电流幅值等级，进入正常工作状态。

通过非线性调频小波变换对电流信号进行分析，对所得到的时频域内二维复数矩阵内
各元素取模，在频率维度上采用积分的处理方式（即平方和运算），构建基于非线性调频
小波变换的 6 个特征量。2.256s 时刻的类弧工况与图 4a 所示类弧工况类似，故而相应基
275 于非线性调频小波变换所构建的特征量幅值也会出现如图 4b~图 4g 一样的显著降低过程，
特征值变化小于相应阈值，阈值判定处于正常工作状态，尽管如图 5h~图 5l 所示基于自
适应最优核时频分布分析所构建的特征量出现如图 3h~图 3l 一样的故障电弧模式，但基
于非线性调频小波变换能够预先给出正确的判断，不进行后续的自适应最优核时频分布分
析。

280 这里的非线性调频小波变换层级仅给出进行后续自适应最优核时频分布及朴素贝叶
斯模型分析的对电流分析结果，如图 5b~图 5g 所示。2.586s 时，基于非线性调频小波
变换的各特征量均出现如图 3b~图 3g 所示的持续幅值增大过程，判定存在频谱能量增大，
转至后续的自适应最优核时频分布分析步骤。通过自适应最优核时频分布对电流信号进行
分析，所得到的时频域内二维复数矩阵内相应元素的实部沿时间维度采用平方和运算的处
285 理方式，在频率维度上采用积分的处理方式，得到基于自适应最优核时频分布的 5 个特征
量，全部时段电流信号的计算结果如图 5h~图 5l 所示。各个特征量在 2.586s 之前的特征
值均幅值极小，其幅值状态明显区别于故障电弧发生之前的正常工作状态（如图 3h~图
3l 内 0.6s 之前的幅值等级和图 5h~图 5l 内 2.8s 以后的幅值等级），故而系统启动过程与
正常工作状态是存在显著的模式差别的，这也证实了基于自适应最优核时频分布所构建的
290 特征量是具有区分故障电弧和类弧工况能力的。2.256s 及 2.586s 时刻分别由非线性调频
小波变换、自适应最优核时频分布发挥作用完成了正确的系统状态判断过程，这充分说明
了多元方法综合判断对准确判断故障电弧的重要性。

将五个计算所得的时频特征值输入至朴素贝叶斯模型，朴素贝叶斯模型因持续出现的
1 输出而达不到触发标准 P，判定此时光伏系统内发生了类弧工况，从而不发出断路器控
295 制信号，继续进行下一时间窗内光伏系统输出电流信号的状态检测。如图 5m 所示的结果，
检测算法能够给出正确的输出（判断其未达到故障电弧切除标准的要求），不造成误判。

总之，本发明所提供的光伏故障电弧检测方法分为非线性调频小波变换-阈值判断和
自适应最优核时频分布-朴素贝叶斯模型分类两步，前一步计算分辨率高，对于故障电弧

的发生时刻捕捉精准，一旦识别当前分析时间窗内有能量增大趋势能够迅速进入后一步。

300 后一步与前一步的交错时序令整个算法消耗内存少，计算效率高。两步中均构建了多个时频特征量，即使个别特征量失效，仍能依靠其他有效特征量正确完成故障电弧与类弧的有效辨识，提高了故障电弧或类弧工况辨识的可靠性，解决了类弧工况干扰下准确、可靠、快速动作光伏系统内故障电弧的问题，有效防止了故障电弧给光伏系统运行、人身财产带来的安全威胁。

权 利 要 求 书

1. 一种基于自适应核函数和瞬时频率估计的光伏系统故障电弧检测方法，其特征在于：该光伏系统故障电弧检测方法包括以下步骤：

1) 对光伏系统内的电流信号，以 T_{NCT} 为时间窗长度进行逐点采样，得到检测信号 x_t ，转至步骤 2)；

5 2) 对检测信号 x_t 作非线性调频小波变换，得到检测信号 x_t 多次迭代的复数时频矩阵，通过选定 u 个迭代复数时频矩阵，以及对选定的迭代复数时频矩阵中指定频率分量处元素的模进行频率维度的平方和运算，构造 n 个特征量 $NC_i(t)$ ， $i=1,2,3\cdots,n$ ，并形成 $n\times T_{NCT}$ 的二维矩阵 $\mathbf{M}$ ，将 $\mathbf{M}$ 沿时间维度求取后一时刻相对前一时刻的特征量变化，并与阈值列向量 $\mathbf{Y}$ 进行相应元素比较，若该时间窗内某采样时刻对应的特征量变化的值大于相应阈值的个数超过 m 个，则判断该时间窗的电流信号存在频谱能量增大，将检测信号 x_t 等分为
10 y 个时段，转至步骤 3)；否则，判断该采样时刻光伏系统处于正常工作状态，继续进行下一采样时刻的对应特征量变化的比较，直至该时间窗的检测信号均为光伏系统正常工作状态时，返回步骤 1) 进行下一时间窗的检测信号采集；

3) 从频谱能量增大的下一时段开始作自适应最优核时频分布，得到在时频域内对应的复数时频矩阵，选定频率维度上 r 个频段，对相应元素的实部进行时间维度的平方和运算得相应列向量，然后对选定的每个频段进行频率维度的积分运算，构造得到 r 个特征量作为输入向量，转至步骤 4)；
15

4) 利用训练好的朴素贝叶斯模型及对应的 r 个特征量的值对该输入向量进行状态分类，若输出值为 0，则判定该时段呈现故障电弧状态，转至步骤 5)；若输出值为 1，则判定是类弧干扰，清零计数变量，返回步骤 1) 进行下一时间窗的检测信号采集；
20

5) 对经所述朴素贝叶斯模型进行状态分类所得的输出值为 0 的时段个数利用计数变量进行计数，当输出值为 0 的时段个数达到 p 个时，则判断光伏系统发生故障电弧，发出电路开断的控制信号以熄灭故障电弧，否则继续按照步骤 3) 进行下一时段的检测信号分析。

25 2. 根据权利要求 1 所述一种基于自适应核函数和瞬时频率估计的光伏系统故障电弧检测方法，其特征在于：所述电流信号为由霍尔传感器采样并经高通滤波后的信号或者为直接由电流互感器采样的信号。

3. 根据权利要求 1 所述一种基于自适应核函数和瞬时频率估计的光伏系统故障电弧检测方法，其特征在于：所述 T_{NCT} 的取值范围为 4~40ms； y 的取值范围为 2~10。

4. 根据权利要求1所述一种基于自适应核函数和瞬时频率估计的光伏系统故障电弧检测方法，其特征在于：所述非线性调频小波变换所选用的多项式阶次的取值范围为10~30；迭代终止条件为迭代达到既定次数即停止，迭代次数的取值范围为3~8；自适应最优核时频分布的输出频率划分尺度的取值范围为256~8192。

5 5. 根据权利要求1所述一种基于自适应核函数和瞬时频率估计的光伏系统故障电弧检测方法，其特征在于：所述 u 的取值范围为2~5；所述频率分量根据故障电弧特征频段进行指定，不同迭代次数上选定的故障电弧特征频段个数相同或不同，故障电弧特征频段均在5~50kHz的范围内选定，所选定的故障电弧特征频段部分重叠或连续分割或存在间隔； n 的取值范围为5~10。

10 6. 根据权利要求1所述一种基于自适应核函数和瞬时频率估计的光伏系统故障电弧检测方法，其特征在于：所述阈值列向量 $\mathbf{Y}$ 中的阈值设定原则为能够获取信号在各特征量层面上的幅值变化模式，不同特征量 $NC_i(t)$ 对应设定的阈值相同或不同； m 的取值范围为 $n-2 \sim n$ 。

15 7. 根据权利要求1所述一种基于自适应核函数和瞬时频率估计的光伏系统故障电弧检测方法，其特征在于：所述 r 个频段根据故障电弧特征频段选定，故障电弧特征频段在(0, 50] kHz的范围进行选定，所选定的故障电弧特征频段部分重叠或连续分割或存在间隔； r 的取值范围为3~7。

8. 根据权利要求1所述一种基于自适应核函数和瞬时频率估计的光伏系统故障电弧检测方法，其特征在于：所述朴素贝叶斯模型在学习训练过程中的输出状态标记方式为：
20 对应时段内的电弧电压为零，则标记为1，对应时段内的电弧电压非零，则标记为0；训练样本容量的取值范围为1500~3000。

9. 根据权利要求1所述一种基于自适应核函数和瞬时频率估计的光伏系统故障电弧检测方法，其特征在于：所述 p 的取值范围为18~120。

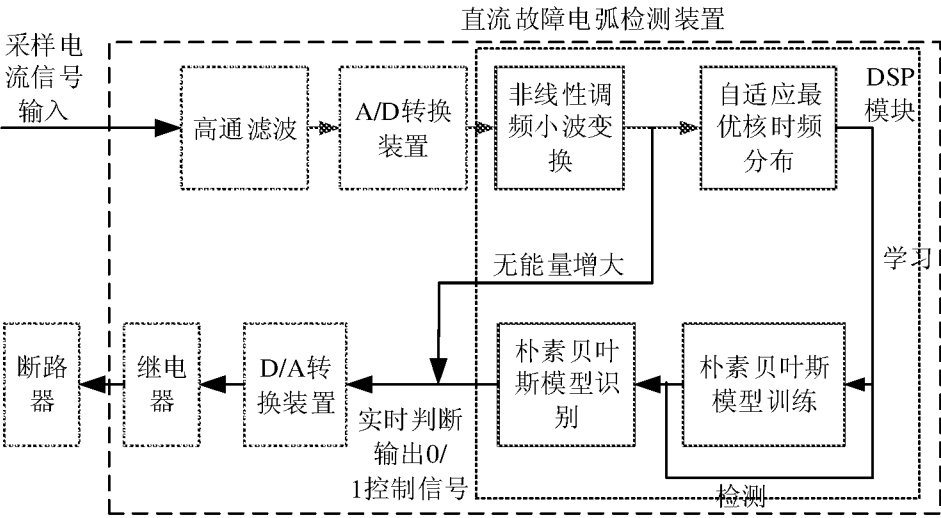


图 1

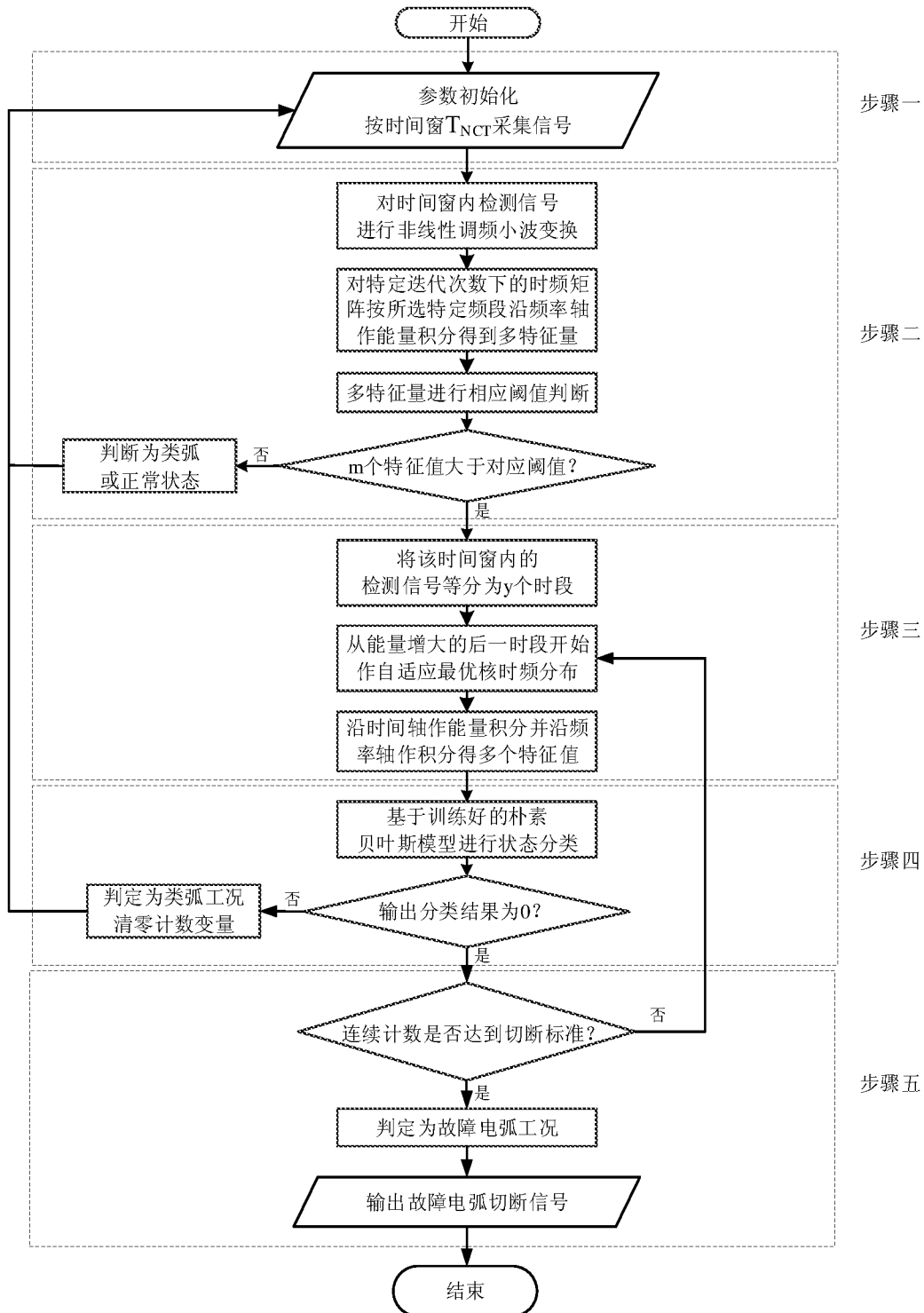


图 2

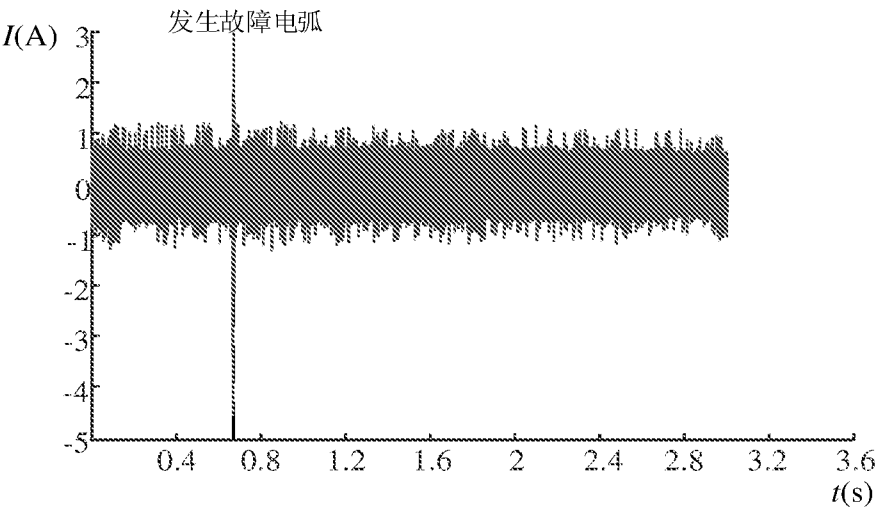


图 3a

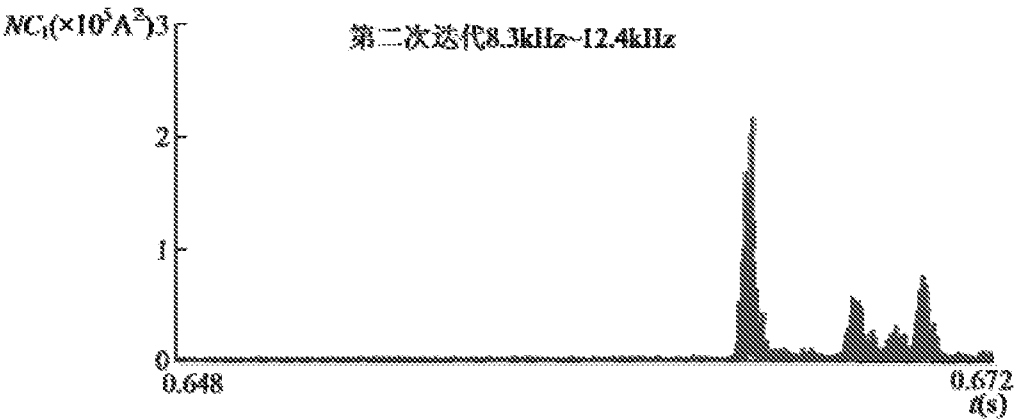


图 3b

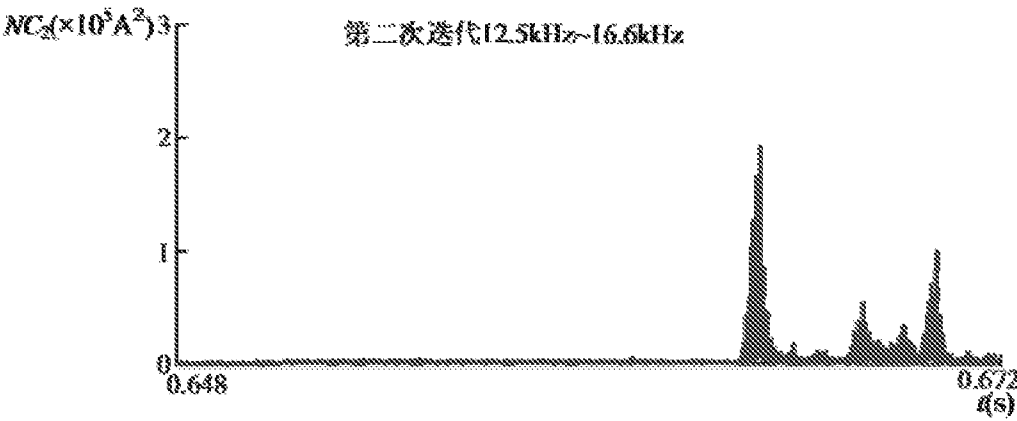


图 3c

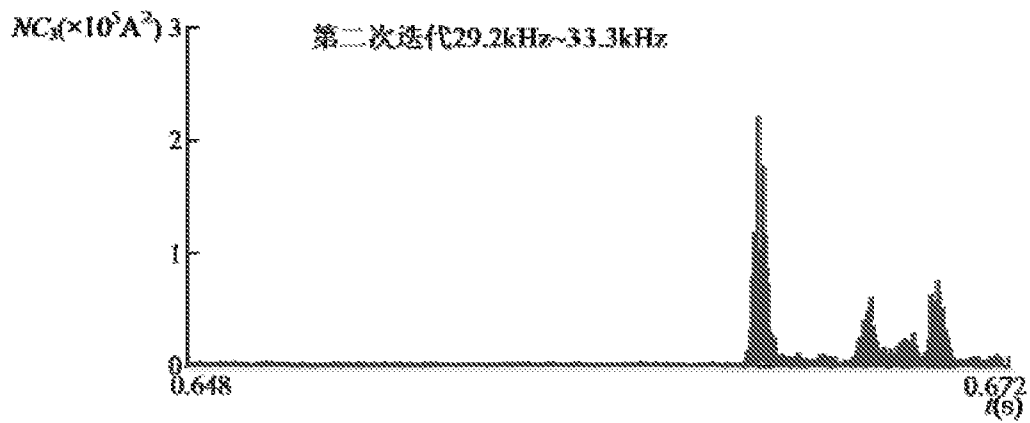


图 3d

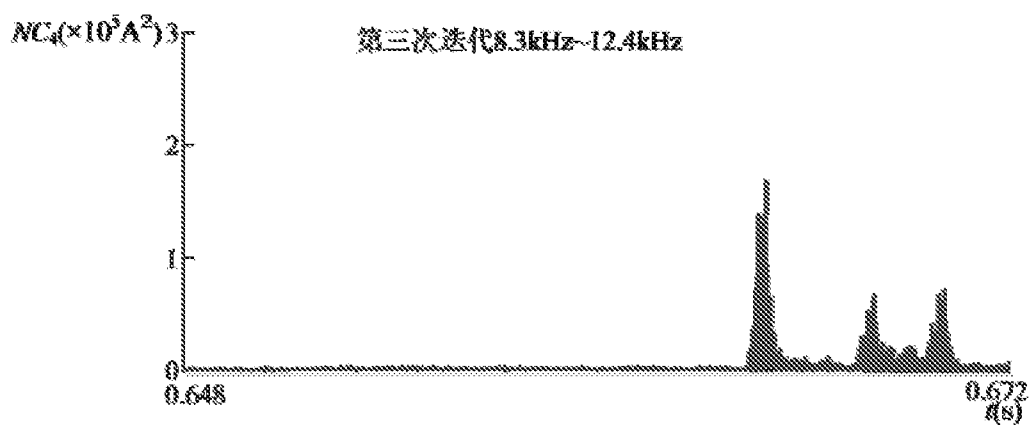


图 3e

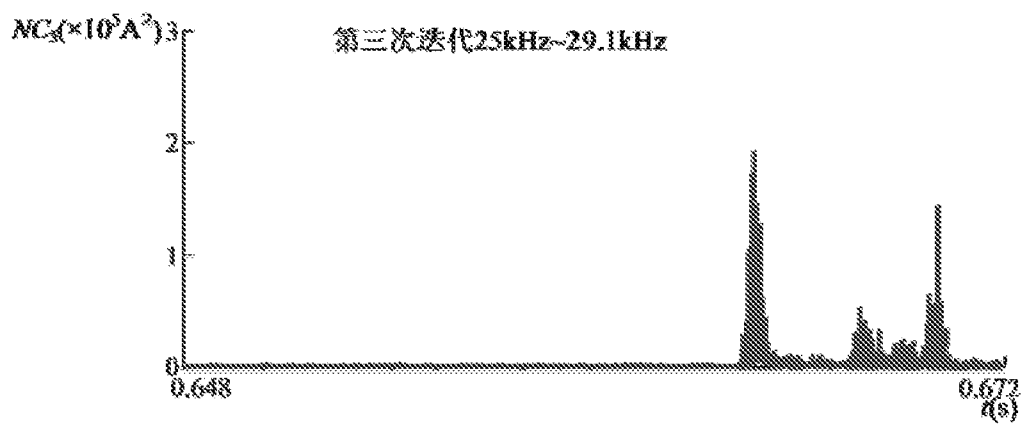


图 3f

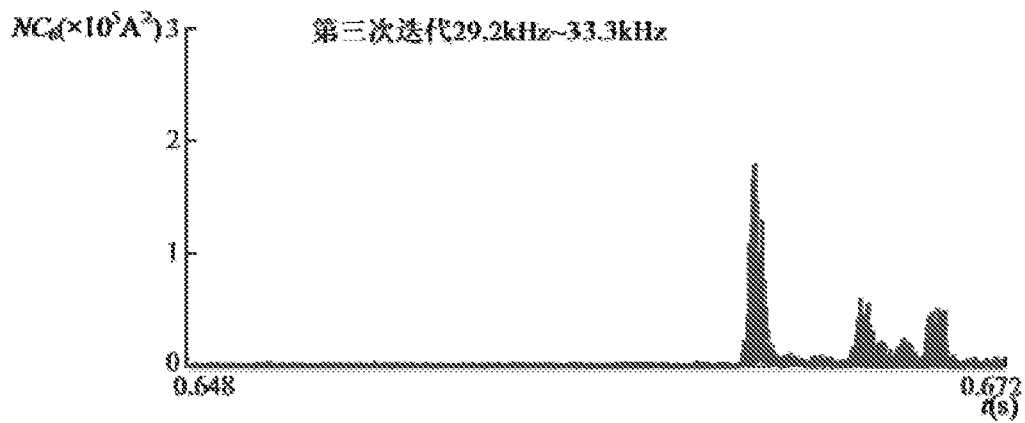


图 3g

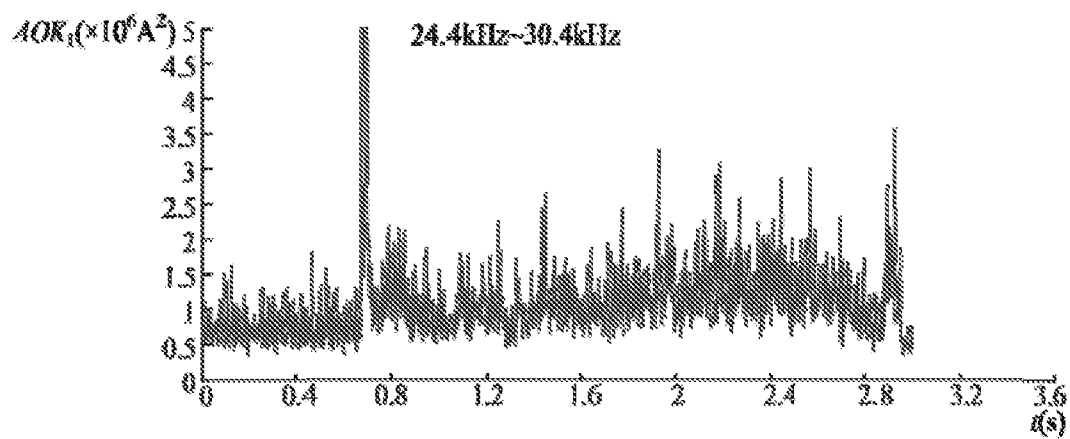


图 3h

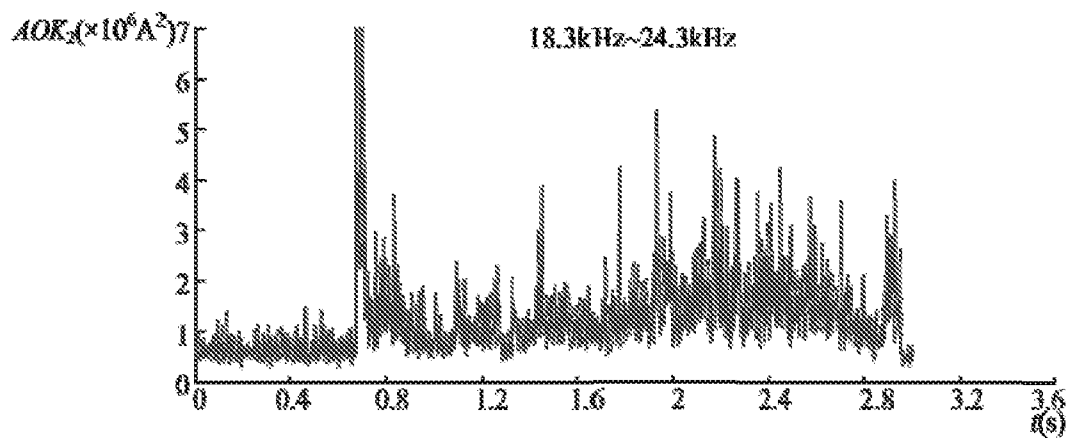


图 3i

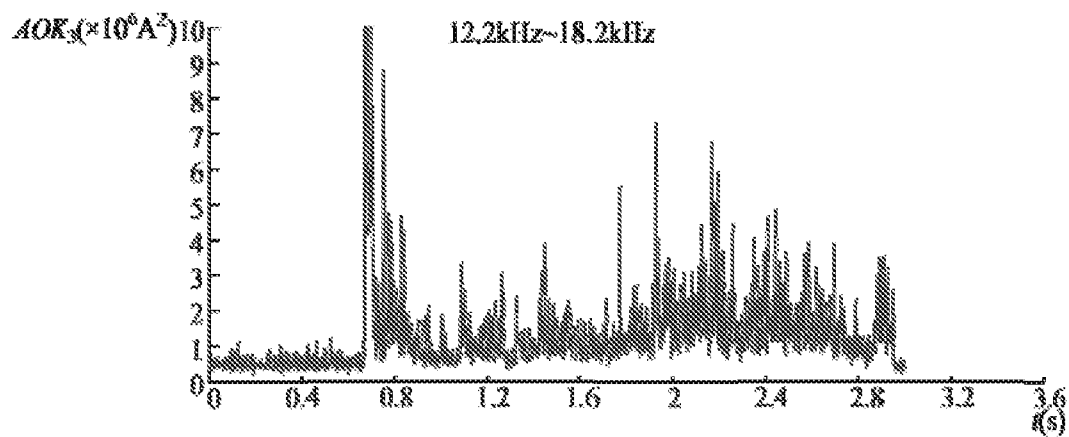


图 3j

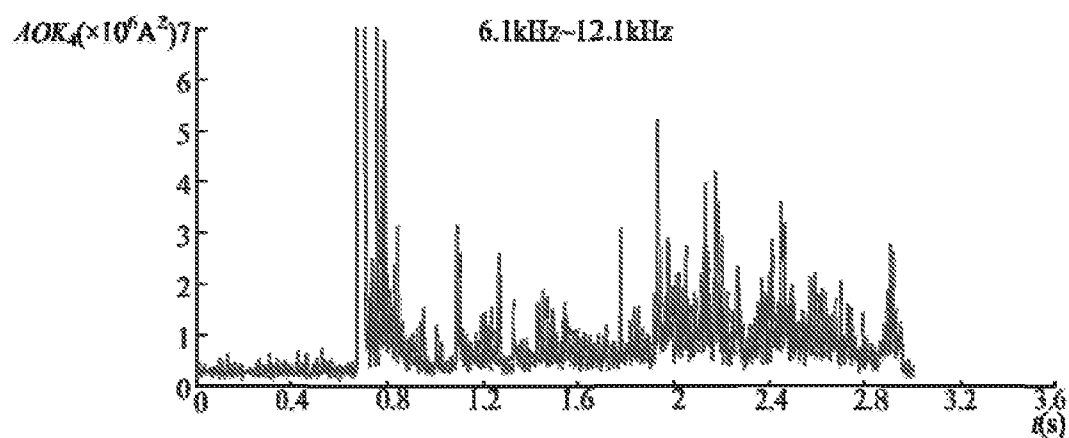


图 3k

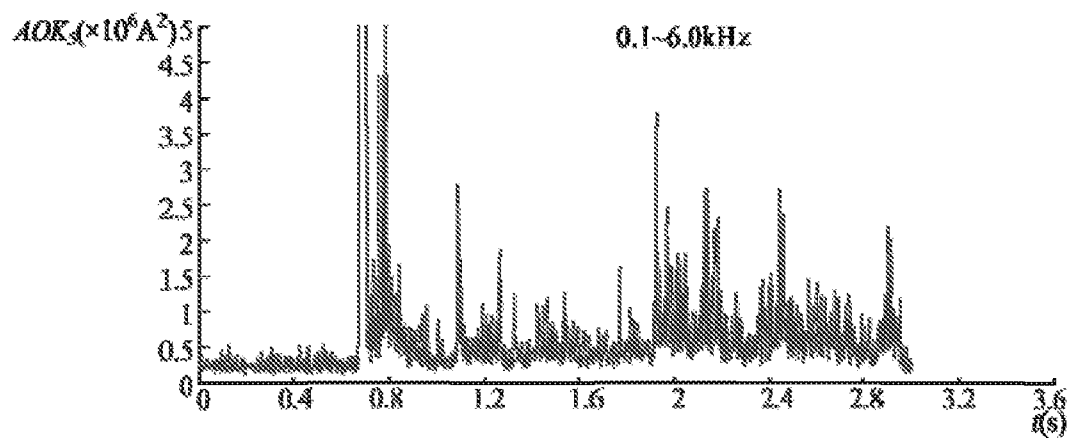


图 3l

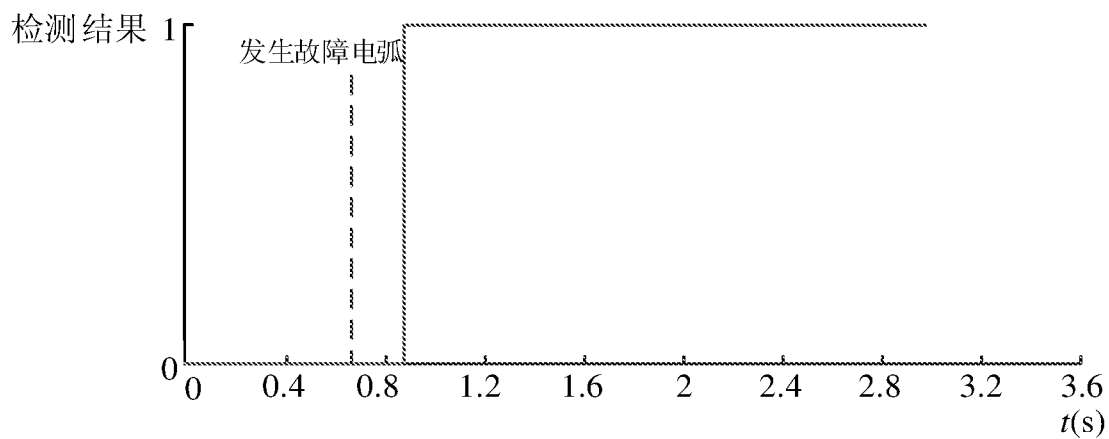


图 3m

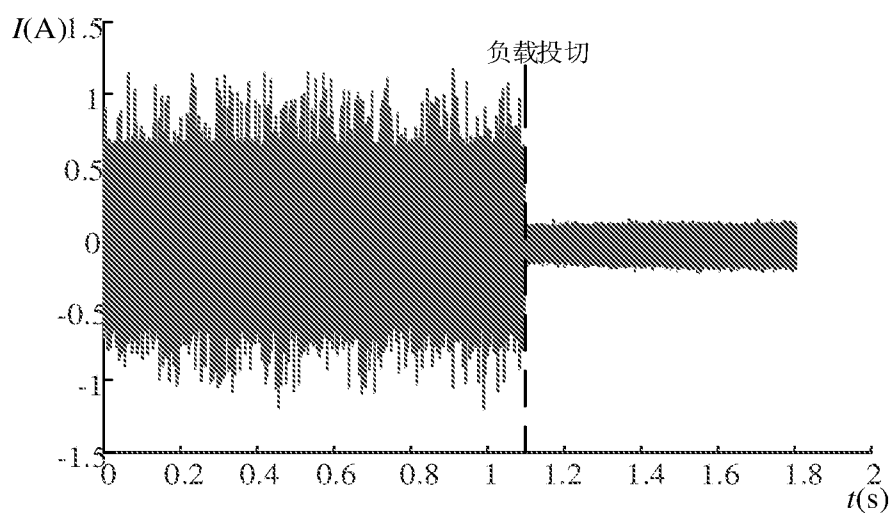


图 4a

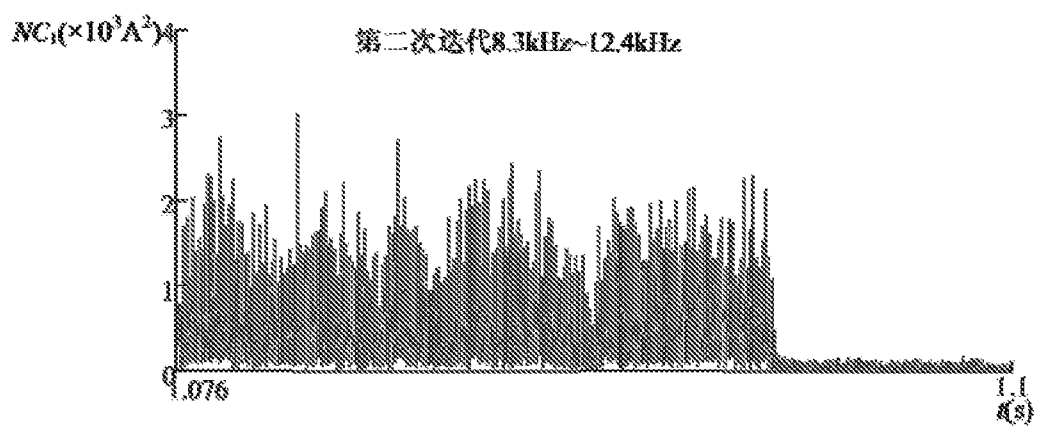


图 4b

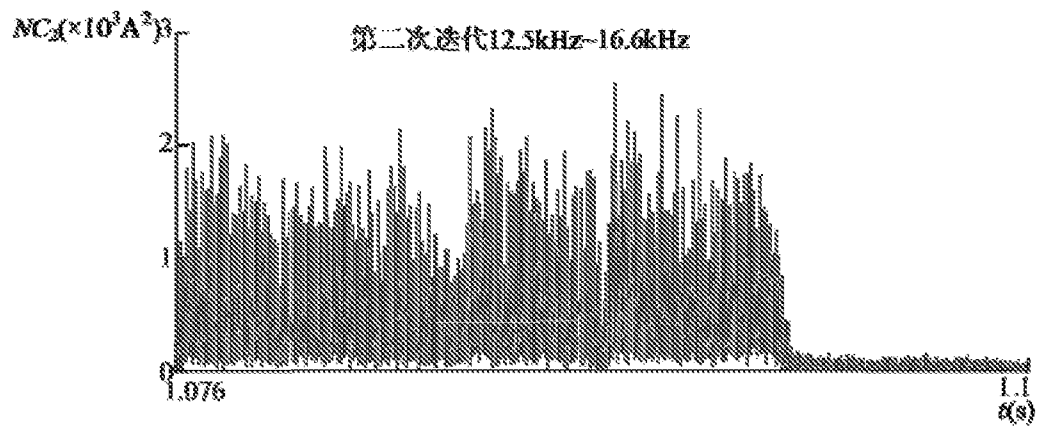


图 4c

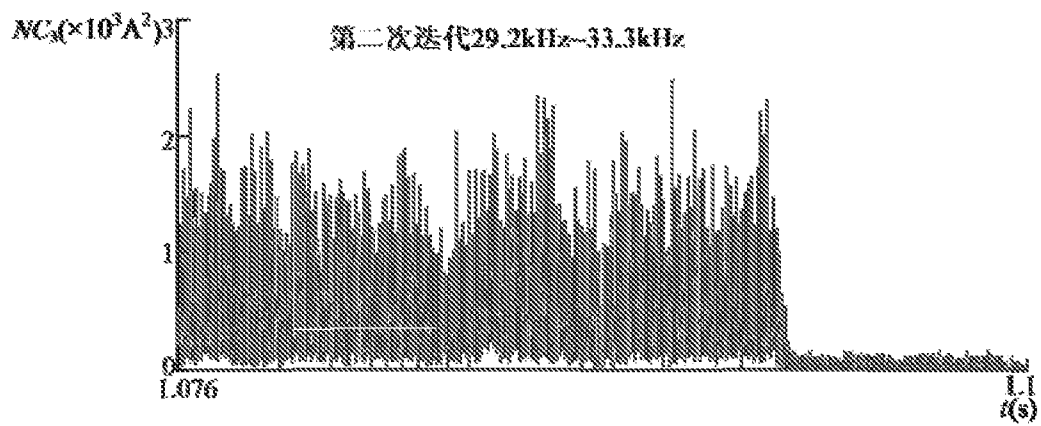


图 4d

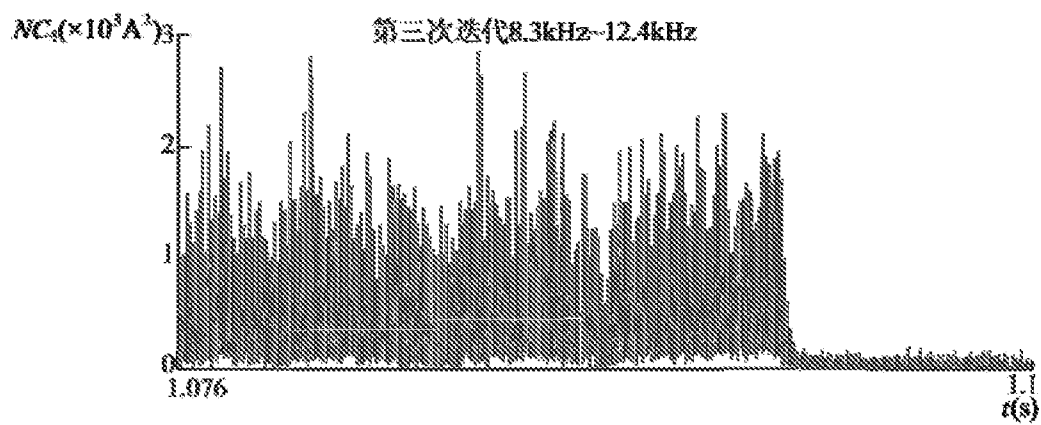


图 4e

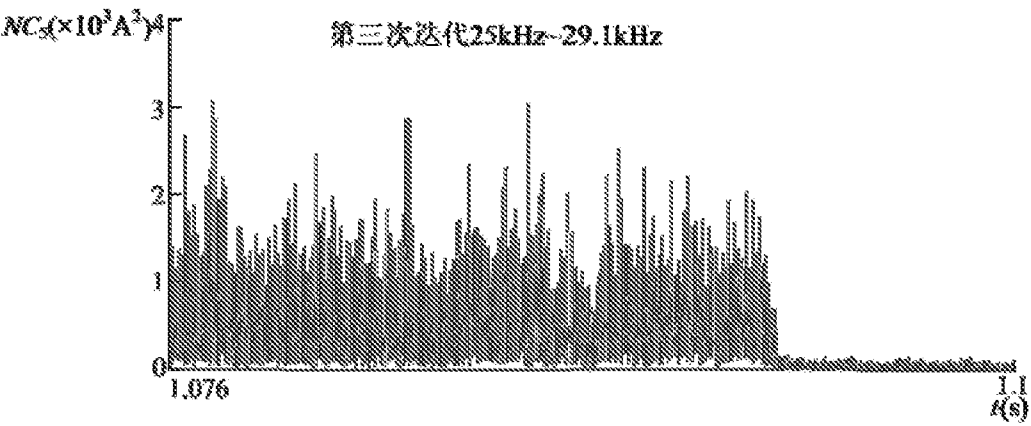


图 4f

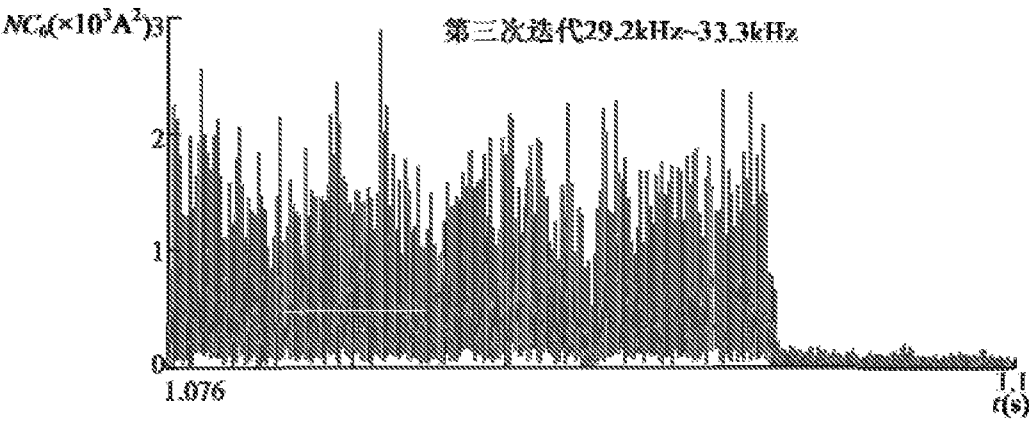


图 4g

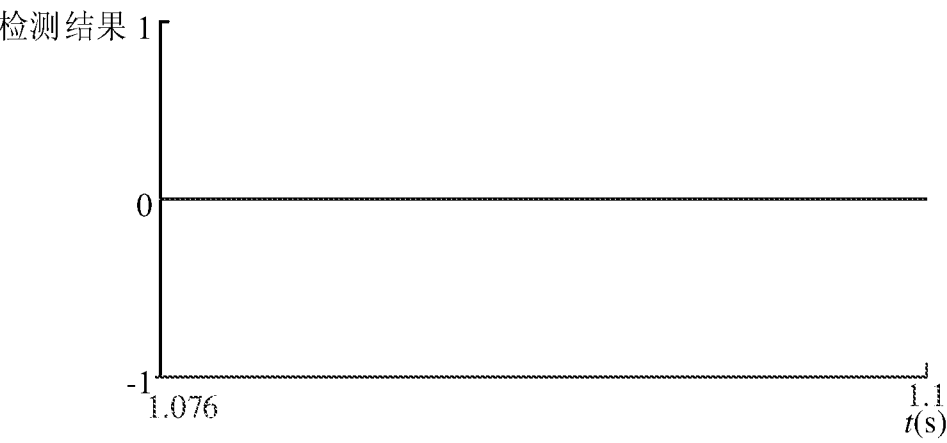


图 4h

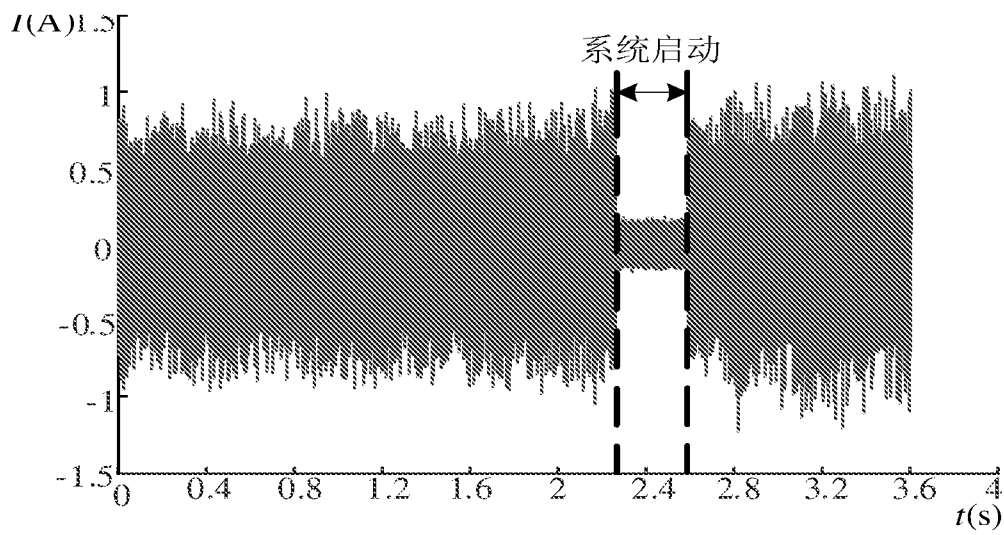


图 5a

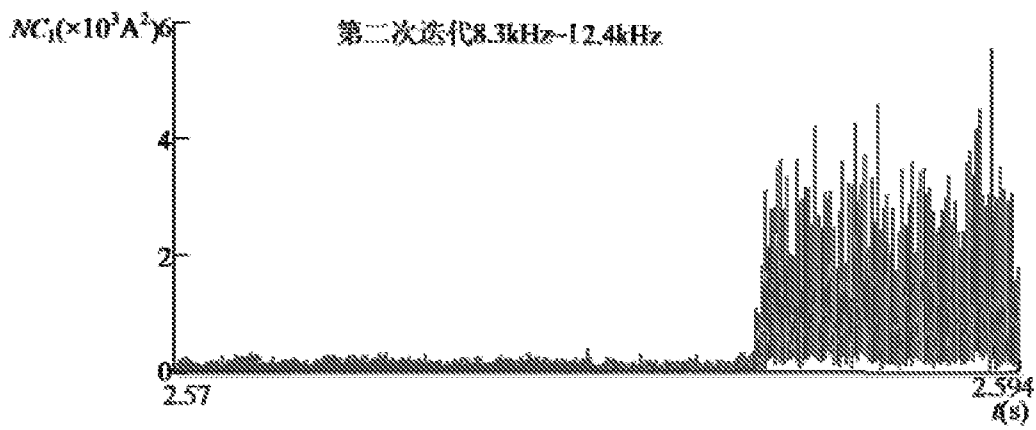


图 5b

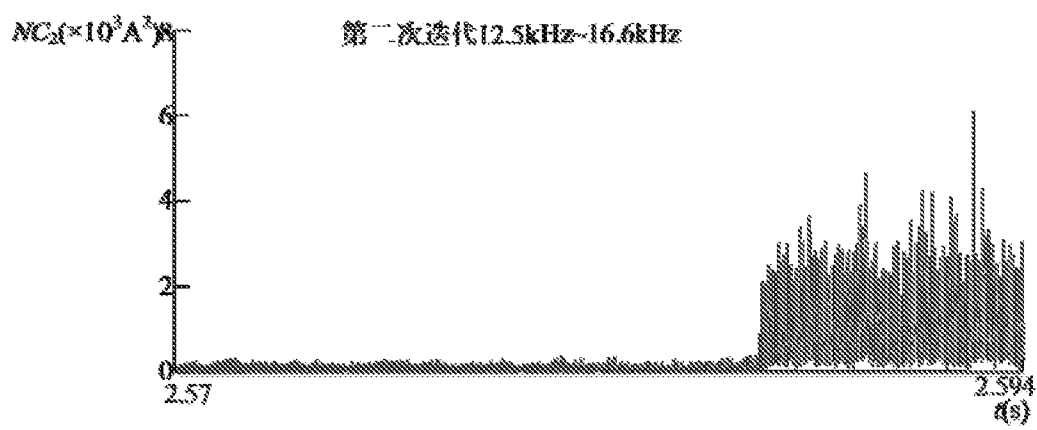


图 5c

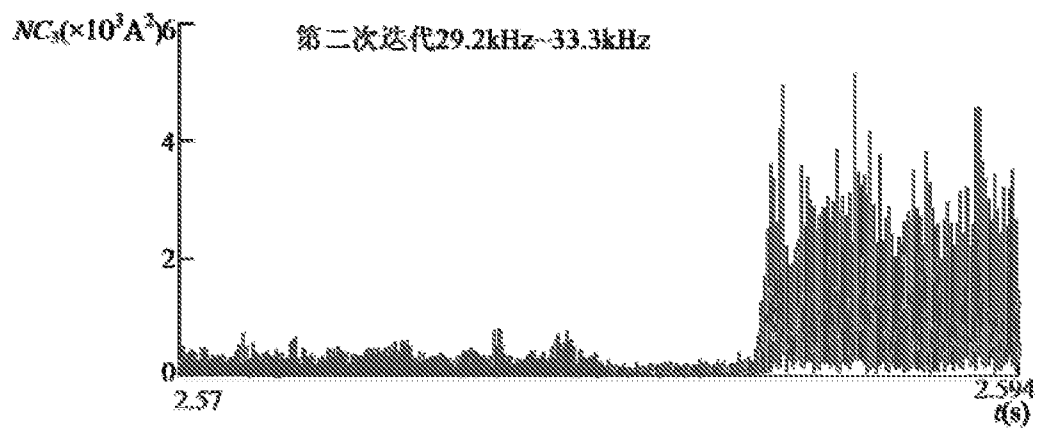


图 5d

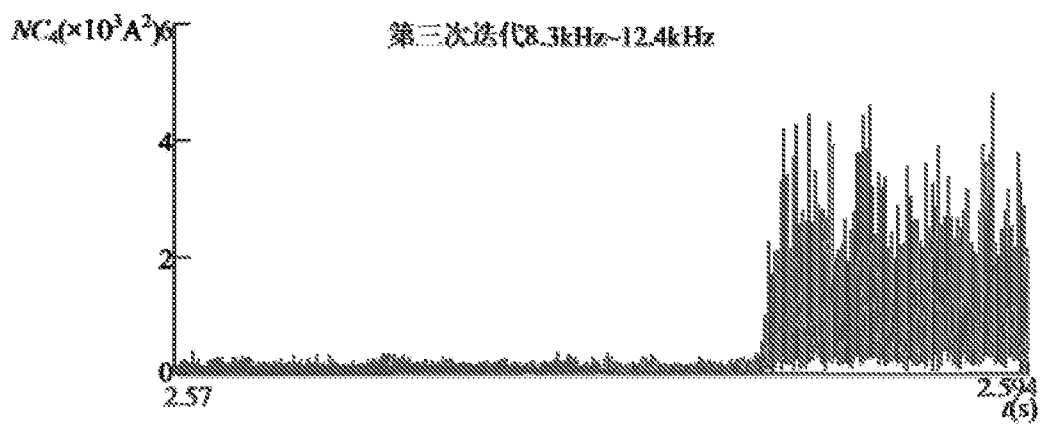


图 5e

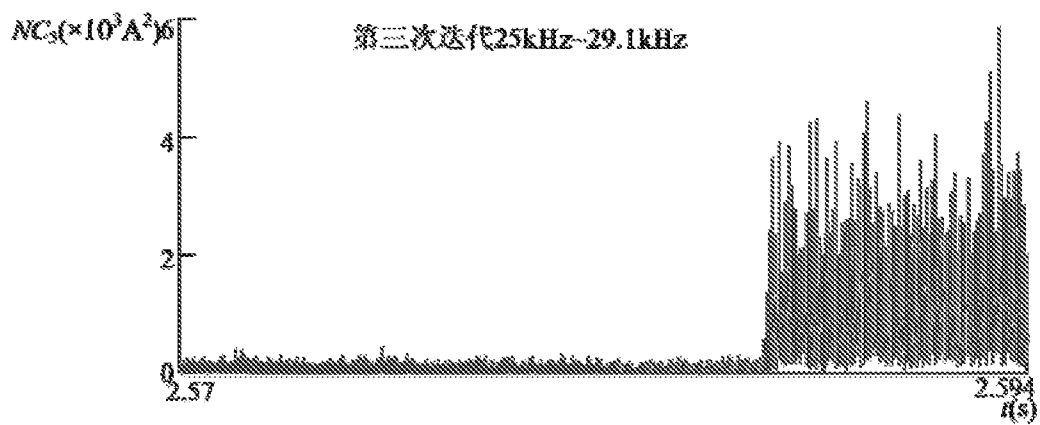


图 5f

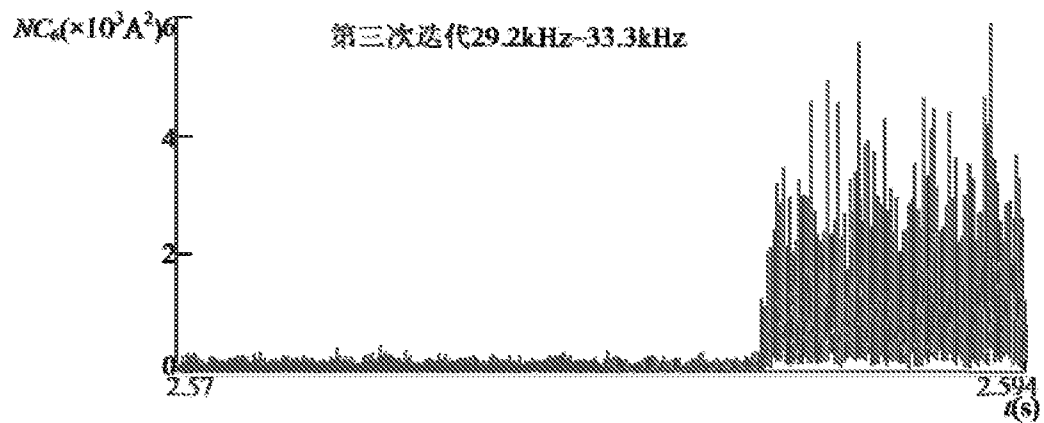


图 5g

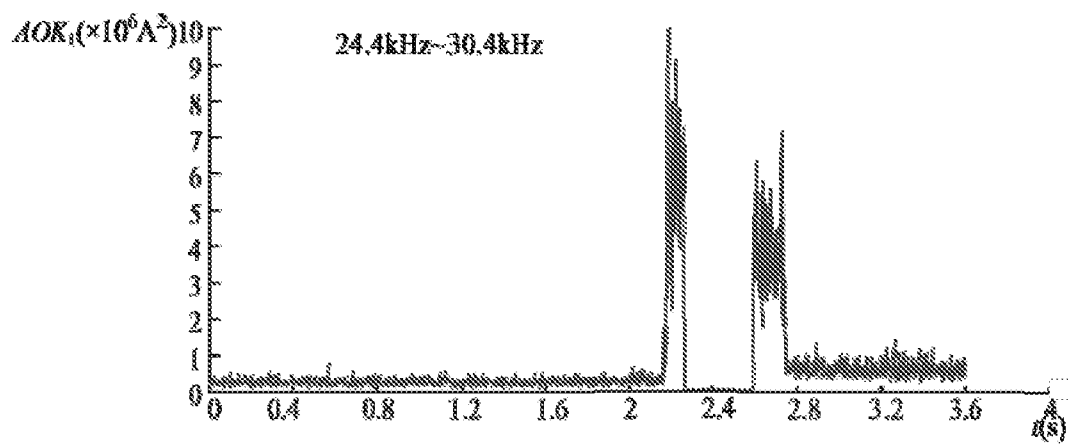


图 5h

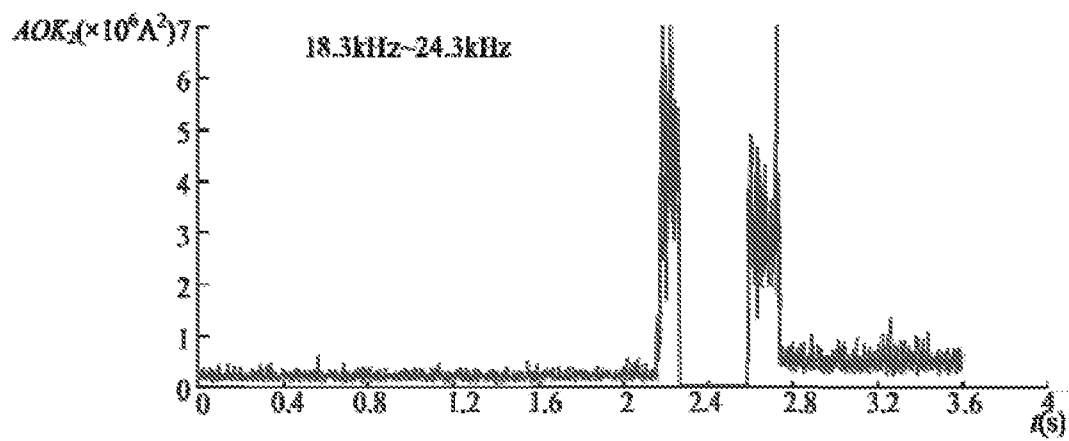


图 5i

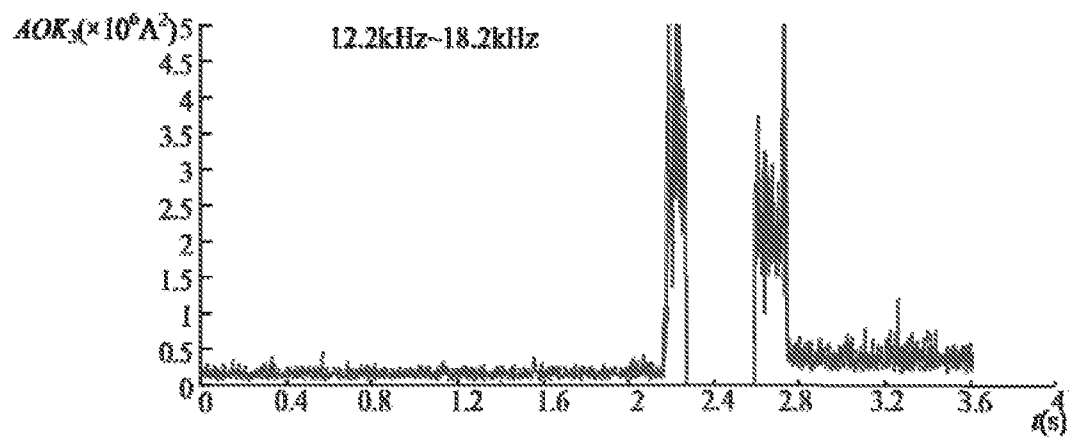


图 5j

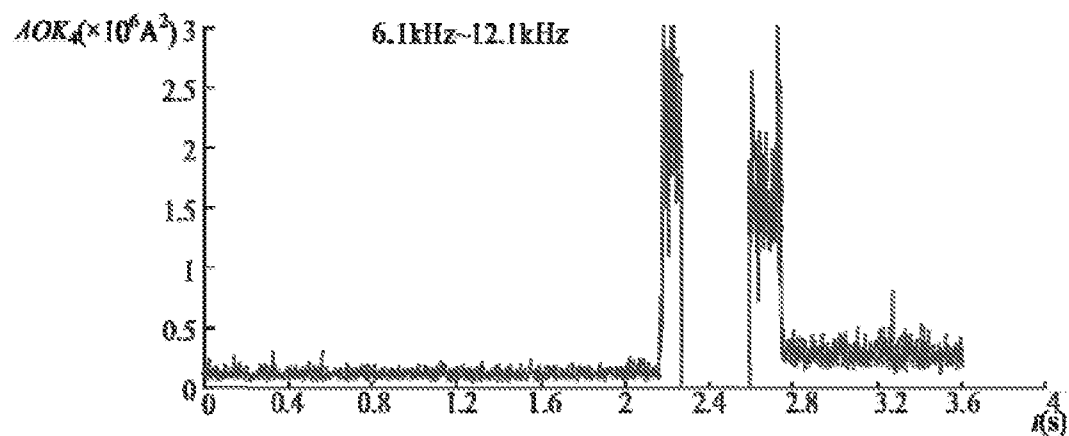


图 5k

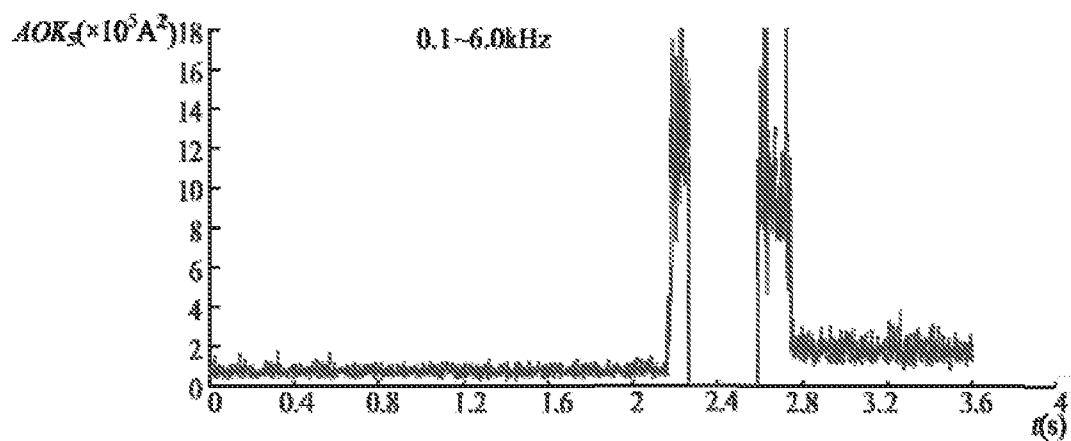


图 5l

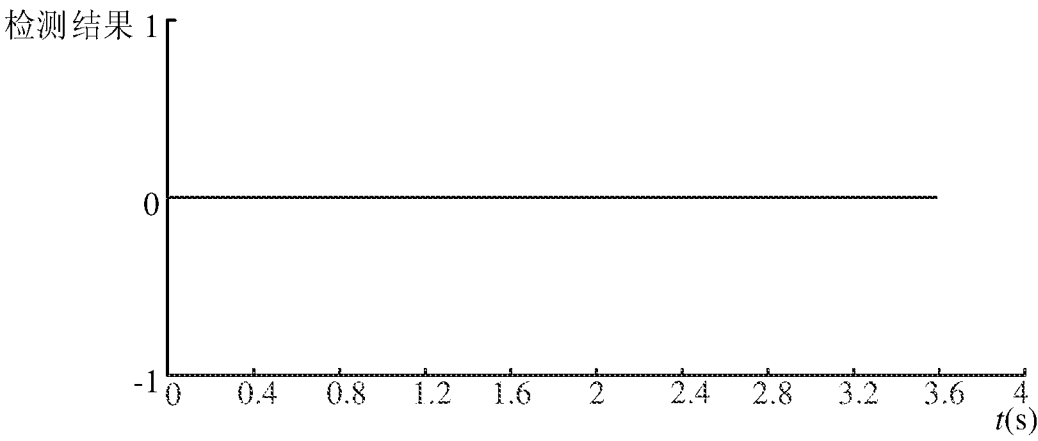


图 5m

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2018/125440

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02S 50/00(2014.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H02S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, IEEE, EPODOC, WPI: 检测, 故障, 电弧, 光伏, 贝叶斯, 自适应, 瞬时频率, solar, photovoltaic, arc, detect, fault, monitor, self, frequency

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 107154783 A (XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY) 12 September 2017 (2017-09-12) description, paragraphs 66-116, and figures 1-5	1-9
A	CN 107181460 A (SHANGHAI INFOTEC ELECTRONICS CO., LTD. ET AL.) 19 September 2017 (2017-09-19) entire document	1-9
A	US 9722535 B2 (DELTA ELECTRONICS SHANGHAI CO., LTD.) 01 August 2017 (2017-08-01) entire document	1-9
A	US 2012174961 A1 (SCHNEIDER ELECTRIC USA, INC.) 12 July 2012 (2012-07-12) entire document	1-9
A	CN 107086855 A (XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY) 22 August 2017 (2017-08-22) entire document	1-9
A	CN 107294494 A (SHANGHAI ROCKCORE ELECTRONICS TECHNOLOGY CO., LTD.) 24 October 2017 (2017-10-24) entire document	1-9



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

11 July 2019

Date of mailing of the international search report

29 July 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

State Intellectual Property Office of the P. R. China
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2018/125440

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	107154783	A	12 September 2017	CN	107154783	B	30 October 2018
CN	107181460	A	19 September 2017	CN	107181460	B	14 December 2018
US	9722535	B2	01 August 2017	US	2016282398	A1	29 September 2016
				CN	106154120	A	23 November 2016
				CN	106154120	B	09 April 2019
US	2012174961	A1	12 July 2012	CN	103299501	A	11 September 2013
				BR	112013017587	A2	04 October 2016
				CN	103299501	B	13 April 2016
				WO	2012096807	A1	19 July 2012
				EP	2664044	A1	20 November 2013
				US	8547669	B2	01 October 2013
				IN	201305125	P4	10 June 2016
CN	107086855	A	22 August 2017	CN	107086855	B	30 October 2018
CN	107294494	A	24 October 2017	CN	207135065	U	23 March 2018

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2018/125440

A. 主题的分类

H02S 50/00 (2014.01) i

按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号)

H02S

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用))

CNPAT, CNKI, IEEE, EPDOC, WPI: 检测, 故障, 电弧, 光伏, 贝叶斯, 自适应, 瞬时频率, solar, photovoltaic, arc, detect, fault, monitor, self, frequency

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 107154783 A (西安交通大学) 2017年 9月 12日 (2017 - 09 - 12) 说明书66-116段、图1-5	1-9
A	CN 107181460 A (上海英孚特电子科技有限公司 等) 2017年 9月 19日 (2017 - 09 - 19) 全文	1-9
A	US 9722535 B2 (DELTA ELECTRONICS SHANGHAI CO., LTD.) 2017年 8月 1日 (2017 - 08 - 01) 全文	1-9
A	US 2012174961 A1 (SCHNEIDER ELECTRIC USA, INC.) 2012年 7月 12日 (2012 - 07 - 12) 全文	1-9
A	CN 107086855 A (西安交通大学) 2017年 8月 22日 (2017 - 08 - 22) 全文	1-9
A	CN 107294494 A (上海岩芯电子科技有限公司) 2017年 10月 24日 (2017 - 10 - 24) 全文	1-9

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2019年 7月 11日

国际检索报告邮寄日期

2019年 7月 29日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局 (ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

授权官员

孔伟

电话号码 86-(10)-53961513

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2018/125440

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	107154783	A	2017年 9月 12日	CN	107154783	B	2018年 10月 30日
CN	107181460	A	2017年 9月 19日	CN	107181460	B	2018年 12月 14日
US	9722535	B2	2017年 8月 1日	US	2016282398	A1	2016年 9月 29日
				CN	106154120	A	2016年 11月 23日
				CN	106154120	B	2019年 4月 9日
US	2012174961	A1	2012年 7月 12日	CN	103299501	A	2013年 9月 11日
				BR	112013017587	A2	2016年 10月 4日
				CN	103299501	B	2016年 4月 13日
				WO	2012096807	A1	2012年 7月 19日
				EP	2664044	A1	2013年 11月 20日
				US	8547669	B2	2013年 10月 1日
				IN	201305125	P4	2016年 6月 10日
CN	107086855	A	2017年 8月 22日	CN	107086855	B	2018年 10月 30日
CN	107294494	A	2017年 10月 24日	CN	207135065	U	2018年 3月 23日