

DOI: 10.7667/PSPC180541

# 一种监测母线槽温升信号的无线传感器动态采样策略

徐乔笙<sup>1</sup>, 谢维成<sup>1</sup>, 江山<sup>1</sup>, 曾传华<sup>1</sup>, 江德凤<sup>2</sup>

(1. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039; 2. 重庆声光有限公司, 重庆 401332)

**摘要:** 母线槽的温升会因异常因素发生快速变化, 但无线传感器受能源和传输速度限制无法一直保持高采样率和高上传率。为了使无线传感器根据温升变化速率自动调节采样间隔和上传频率, 改进了一种无线传感器节点动态采样策略 FDSI。首先分析了原采样策略对于采集变化快速的温升信号的缺陷, 然后对其调节采样间隔的方法做出调整, 最后利用 Matlab 仿真进行两者的对比研究。结果表明对于监测密集型母线槽温升信号, 调整后的无线传感器动态采样策略与原策略相比信息丢失更少, 冗余采样更少。

**关键词:** 无线传感器; 母线槽; 采样策略; 温升

## A wireless sensor dynamic sampling strategy for monitoring temperature rise signals of busway

XU Qiaosheng<sup>1</sup>, XIE Weicheng<sup>1</sup>, JIANG Shan<sup>1</sup>, ZENG Chuanhua<sup>1</sup>, JIANG Defeng<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China;  
2. Chongqing Sound and Light Co. Ltd, Chongqing 401332, China)

**Abstract:** The temperature rise of the busway will change rapidly due to abnormal factors, but the wireless sensor can not keep high sampling rate and high uploading rate all the time because of the energy and transmission rate limit. A wireless sensor node dynamic sampling strategy, FDSI, is improved to automatically adjust the sampling interval and upload frequency according to the temperature rise rate. Firstly, the shortage of the original sampling strategy for sampling under the rapid change of busway temperature rise is analyzed. Then it changes the way in which the original sampling strategy adjusts the parameters. Finally, the Matlab simulation is used to compare the two methods. The results show that the dynamic sampling strategy of the adjusted wireless sensor is less than the original strategy, and the redundant sampling is less than the original strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61307063).

**Key words:** wireless sensor; busway; sampling strategy; temperature rise

## 0 引言

电网断面的热稳定极限在系统安全性方面起着越来越重要的作用<sup>[1]</sup>。母线槽的温升是指导体温度和环境温度的差值, 当母线槽自身温度上升到一定极限值时就会加速绝缘老化, 甚至破坏绝缘<sup>[2]</sup>。如果对母线槽缺乏长期深入的监测, 无法评估其状态, 容易造成难以控制的突发灾难。近期多座变电站因为铝母线温度升高而融化导致单相短路故障的发生, 造成了停电事故<sup>[3]</sup>。未来配电网的管控将依托

于大量信息的高效采集和综合利用<sup>[4]</sup>, 母线温升是需要采集的重要信息之一。文献[5-6]建立了母线的温升模型, 为母线状态监测提供参考方法和依据。现有有线的通信光缆和电力专网存在网络覆盖有限、通信方式单一、造价成本高、使用维护费用高等不足, 采用传统电力通信的数据采集方案不具备经济性和可行性<sup>[7]</sup>。文献[8-14]提出了一些母线温升监测的方案, 可以看出采用无线传感网络(WSN)监测是未来的趋势。WSN 是由大量廉价、密集的智能无线传感节点构成的一种无线通信网络, 它无需电源电缆和通信电缆而实现多点监测, 为电力设备远程在线监测和诊断提供一个新的视角<sup>[15]</sup>。精简数据量是延长 WSN 寿命以长期稳定监测母线槽的关键。正常工作状态下, 母线槽的温升一般和通过的电流

**基金项目:** 教育部“春晖计划”(Z20151115); 国家自然科学基金项目资助(61307063); 四川省教育厅自然科学基金重点项目资助(15ZA0127); 四川省教育厅重大培育项目资金资助(17CZ0033)

大小正相关; 如果出现过负荷、绝缘材料老化、连接固件松动等异常情况, 会导致温升值出现快速变化, 并且幅值和持续时间的随机性较强, 需要提高采样率和上传率才能准确捕捉信号特征。因此需要设计一种能根据母线槽温升变化速率自动调整采样率和上传率的动态采样策略。

文献[16]提出的环境感知采样策略, 利用复数节点采集某种环境里相互关联的不同信号以形成一个系统, 达到信息共享实现采样率的精准调整, 但要求信号之间关联性强, 且硬件成本较高。文献[17]采用 Wright's 对 Holt's 双指数平滑法的改进方法进行预测, 通过实际值和预测值的差值调整采样率, 但需要根据实际情况设计 7 个参数, 前期准备工作复杂。文献[18]将监测区域从空间上划分, 通过簇头节点表征某一区域的状态, 当出现异常数据后再激活感知网格内其他节点来获得详细信息, 时延较长且系统稳定性过于依赖簇头节点的稳定性。文献[19-23]是以压缩感知为主的稀疏采样, 假定被收集的数据稀疏特性不随时间动态变化, 以固定的采样率采集被测信号, 即使文献[23]加入了一些动态策略, 但对于幅值突然大幅变化的信号的重构精度仍不理想。文献[24-25]利用神经网络预测信号变化调节采样率, 但预测精准度依赖相关辅助信号的数量, 并且文献[25]仅将采样率降低了 30%。

文献[26]提出了一种根据信号时空相关性的无线传感器节点动态采样策略(Dynamic Sampling Interval, DSI), 其对幅值缓慢变化的信号有较为良好的采集效果, 但其采样间隔调整速度过慢, 不能及时适应异常情况下温升幅值的大幅变化, 从而造成一定程度的信息丢失。为此, 提出了一种改进的自适应采样策略(Fast Dynamic Sampling Interval, FDSI), 在 DSI 的基础上考虑母线槽温升的特点, 将采样间隔的逐步调整改进为直接映射, 缩短调整时间, 使其更适用于母线槽温升信号的采集。

## 1 DSI 采样策略描述

DSI 采样策略是一种复合采样策略, 包括数据上传策略和采样间隔调整策略两部分。

对于数据上传, 第一个上传条件是当前采样值与上次上传的采样值间的差值的绝对值超过阈值  $\Delta$ 。阈值  $\Delta$  是需要设计的参数, 决定信号的分辨率。相邻两次无线上传的采样值之间应满足:

$$|x_n - x_{n-1}| \geq \Delta \quad (1)$$

式中:  $x_n$  和  $x_{n-1}$  分别表示第  $n$  个和第  $n-1$  个采集周期无线上传的采样值;  $\Delta$  的值与信息丢失率成正

比, 和数据量成反比。

定义采集周期为相邻两次上传数据的时间间隔, 一个采集周期包含多个采样过程, 第  $n$  个采集周期间隔可以表示为

$$T_n = \sum_{i=1}^{N'_n} \tau_n^i \quad (2)$$

式中:  $T_n$  为第  $n$  个采集周期;  $N'_n$  为第  $n$  个采集周期内实际采样次数;  $\tau_n^i$  为第  $n$  个采集周期内第  $i$  次采样间隔。

第二个上传条件是当前采样值与上次无线上传采样值之间的差值长时间无法超过阈值  $\Delta$  时, 规定第  $n$  个采集周期内的采样次数上限为  $N_n$ , 即无论差值是否超过  $\Delta$ , 均将第  $N_n$  个采样值上传,  $N_n$  依据式(3)自动调整。

$$\|x_n - x_{n-1}| - \Delta| \leq \mu \quad (3)$$

式中,  $\mu$  为远小于  $\Delta$  的常数。式(3)成立则取第  $n+1$  个采集周期内采样次数为  $N_{n+1} = N_n - 1$ , 规定其下限为 1; 反之取  $N_{n+1} = N_n + 1$ , 规定其上限为  $N_{\max}$ 。

对于采样间隔调整, 为使采样值满足均匀分布原则, 考察第  $n$  个采集周期内第  $i-1$  ( $i > 1$ ) 次采样值与上一个上传采样值的差值是否满足式(4)。

$$|x_n^{i-1} - x_{n-1}| > \frac{i-1}{N_n} \cdot \Delta \quad (4)$$

式中,  $x_n^{i-1}$  表示第  $n$  个采集周期内第  $i-1$  ( $i > 1$ ) 次采样值。式(4)成立则  $\tau_n^i$  变小, 反之  $\tau_n^i$  变大并规定  $\tau_n^i \leq T_{n-1}$ 。

## 2 DSI 采样策略弊端分析

为了准确监测母线槽的异常温升, 首先必须检测到异常温度, 然后及时调整采样间隔。高采样间隔意味着低能耗和低数据量, 但信息丢失率高。若采样间隔调整不及时, 在信号变化时仍保持长采样间隔, 同样会造成信息丢失。DSI 在上述两点上存在明显的缺陷。

由于文献[26]并未给  $\tau_n^i$  的变化定量, 以下分析规定单次  $\tau_n^i$  的改变值为  $\pm r$ , 并仅针对处于长期稳定后的信号在扰动下幅值发生变化的情况。

假设上次因超过阈值  $\Delta$  发生数据上传时的  $N_n = N_0$ , 这次采样周期最后一个采样间隔为  $\tau_0$ , 之后信号处于长期稳定, 即采样值差值不超过  $\Delta$ 、式(3)始终成立、式(4)始终不成立。记  $T_n$  为信号平稳后的第  $n$  个采集周期,  $\tau_n$  为第  $n$  个采集周期内最后一个采样间隔, 两者的递推关系如式(5)~式(8)所示。

$$T_1 = N_0 \cdot \tau_0 + \frac{N_0 \cdot (N_0 + 1)}{2} \cdot r \quad (5)$$

$$\tau_1 = \tau_0 + N_0 \cdot r \quad (6)$$

$$T_n = [N - (n-1)] \cdot \tau_{n-1} + \frac{[N - (n-1) + 1] \cdot [N - (n-1)]}{2} \cdot r \quad (7)$$

$$\tau_n = \tau_{n-1} + [N - (n-1)] \cdot r \quad (8)$$

为验证  $\tau_n$  是否会大于  $T_{n-1}$ ，对  $T_{n-1}$  和  $\tau_n$  作差，得

$$T_{n-1} - \tau_n = \frac{1}{2} \cdot (N - n + 1) \cdot (N - n + 2) \cdot r \quad (9)$$

易知式(9)始终大于0，故  $T_{n-1}$  不会影响  $\tau_n$  的上限，实际上  $\tau_n$  的通项公式为

$$\tau_n = \tau_0 + \frac{N_0 \cdot (N_0 + 1)}{2} \cdot r \quad (10)$$

可知当  $N_0 = N_{\max}$  时  $\tau_n$  有最大值，当取  $r=1$  时， $N_0=10$  且忽略  $\tau_0$ ，则稳定后  $\tau_n=55$ ，这意味着 55 s 内传感器不会采集信号。

由于  $\tau_n^i$  及  $N_n$  都是逐步调整，缓慢适应信号变化，为了追踪信号变化需要较长的调整时间，无法及时适应信号变化速率。假设  $\tau$  是目标采样间隔，则自采集到第一个非稳态信号后，调整至目标采样间隔所需的最短时间为

$$t = \frac{(\tau_n - r + \tau) \cdot (\tau_n - \tau)}{2 \cdot r} \quad (11)$$

当信号幅值变化速度较快时， $\tau \ll \tau_n$ 。忽略  $\tau$  并令  $\tau_n = m \cdot r$ ，得

$$t = \frac{m \cdot r}{2} (m \cdot r - 1) \quad (12)$$

式中， $m$  为和  $N_0$  正相关的系数，易知  $\tau_n$  和  $t$  正相关。 $\tau_n$  越大，传感器在信号平稳时能耗越低，数据量越少，但适应信号变化需要的  $t$  越大；反之在信号平稳时能耗越高，数据量越多，但适应信号变化需要的  $t$  越小，这给  $N_{\max}$  和  $r$  的定值带来困难。适应信号变化需要的时间将直接影响到信息丢失的多少，这对于母线槽温升的监测是不利的。

### 3 FDSI 采样策略

母线槽温升信号幅值的变化及持续时间具有较强的随机性，稳态时需要的采样间隔与异常因素影响下需要的采样间隔关系不大。故需要减少稳态和异常状态之间的联系，对采样间隔  $\tau_n^i$  建立独立的调整规则。增加上次采样间隔作为调整当前采样间隔的参数，以平均斜率反应信号变化趋势，并根据

平均斜率的值定量调整采样间隔。一个采集周期内第  $i$  个平均斜率  $k_{i+1}$  的计算方法如式(13)所示。

$$k_{i+1} = \begin{cases} \frac{|x_n^i - x_n^{i-1}|}{\tau_n^i}, & i \geq 2 \\ \frac{|x_n^i - x_{n-1}^i|}{\tau_n^i}, & i = 1 \end{cases} \quad (13)$$

选取恰当的函数  $\tau_n^{i+1} = f(k_{i+1})$  调整下一次的采样间隔，这里选取式(14)所示的函数作为映射模型。

$$\tau_n^{i+1} = \begin{cases} -(\tau_{\max} - 1) \cdot k_{i+1} + \tau_{\max}, & 0 \leq k_{i+1} < 1 \\ 1/k_{i+1}, & k_{i+1} \geq 1 \end{cases} \quad (14)$$

式中， $\tau_{\max}$  表示规定的最大采样间隔。当信号变化较慢 ( $k_{i+1} < 1$ ) 时，采样间隔线性调整；当信号变化较快 ( $k_{i+1} > 1$ ) 时，采样间隔与  $k_{i+1}$  值成反比。采样间隔需要设定一个最小值，防止信号变化过快使采样间隔过小。

对于单个采样周期内采样次数上限  $N_n$ ，选取一次函数作为映射模型，可表示为

$$N_{n+1} = 2 \cdot |x_n - x_{n-1}| + 1 \quad (15)$$

需为  $N_{n+1}$  设定合理的上限。非稳态信号存在时间较长会使  $N_{n+1} = N_{\max}$ ，当信号平稳后  $N_{n+1}$  很快调整到目标值。

在信号的极值附近，信号差值较小，导致采样间隔增大从而丢失部分信号。为了更好地捕捉极值，规定当  $k_{i+1} \leq 0.2$  时做极值点判定，保持最小采样间隔取  $x_n^{i+1} - x_n^i$  和  $x_n^i - x_n^{i-1}$ ，两者同号判定为非极值点，认同  $k_{i+1}$  值；否则判定为极值点，舍去  $k_{i+1}$  值并保持最小采样间隔。

### 4 采样策略评估指标

采样率调整的目标在于避免不必要的采样，从而降低能耗和数据量。但降低采样率会导致漏掉一些重要的信号信息，因此衡量算法性能最基本的指标为采样率和信息丢失率。

采样率定义为每秒从连续信号中提取并组成离散信号的采样个数。采样率越低，则采样策略节省的能耗和生成的数据越少，但为了获取信号特征，高采样率又是必须的。因此提出冗余采样率  $\sigma$ ，认为只有上传的数据点是有效采样，未上传的数据点为冗余采样。冗余采样率越小，每次采样获得的信息越多。在区间  $[a, b]$  上，用  $p$  代表上传点的个数， $q$  代表未上传点的个数，则冗余采样率为

$$\sigma = q / p \quad (16)$$

在获取到离散序列后，一般使用某种算法还原

为原始连续信号, 这里使用Matlab中的三次多项式插值对信号进行还原。用  $f(x)$  表示原始信号,  $g(x)$  表示插值法还原的信号, 则两条曲线越接近,  $|f(x) - g(x)|$  值越小, 偏移量越小, 信息丢失率越低。在区间  $[a, b]$  上的定义平均偏移量  $\varepsilon$  为

$$\varepsilon = \frac{\int_a^b |f(x) - g(x)|}{b - a} \quad (17)$$

仿真将使用冗余采样率和平均偏移量两种指标评估两种采样策略的性能。

## 5 仿真实验及分析

以Matlab软件为工具, 使用控制变量法分析幅值变化速率、变化持续时间以及阈值  $\Delta$  对采样策略的影响。仿真需要的信号由式(8)所示函数进行模拟。

$$y(x) = \begin{cases} h \cdot \sin(0.5 \cdot (x - 2\pi + 10)) + g, & a \leq x \leq b \\ g, & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $g$  表示信号处于平稳状态下幅值的大小;  $h$  表示信号偏离平稳状态的程度, 其值越大则信号幅值变化速率越快; 区间  $[a, b]$  的长度表示信号变化的持续时间。

取  $\Delta = 2$ ,  $r = 2$ ,  $\tau_n^i \in [0.5, 10]$ , DSI从最大采样间隔调整到最小采样间隔所需要的最短时间  $t$  根据式(11)为20.19, 故截取的区间长度需大于20.19。这里选取区间  $[10\pi - 10, 24\pi - 10]$  作为信号变化区间。假设信号已经长期处于稳态, DSI与FDSI的参数均为该状态下的稳定值。下面给出  $h = g = 4$ 、 $h = g = 16$  和  $h = g = 64$  时两种采样策略的仿真结果, 其中实心点表示上传的采样值, 空心表示未上传的采样值。需要说明的是, DSI与FDSI均对式(18)模拟的信号进行采样, 为方便比较采样效果, 将FDSI的采样结果进行了  $y$  轴正方向上不同单位长度的平移, 平移与采样效果无关。

可以看出, 在信号发生变化之后, 由于稳态时的采样间隔过长, 两种策略都丢失了部分信息。在30 s时捕捉到信号的变化, DSI逐步降低采样间隔, 到50 s附近调整至目标采样间隔; FDSI立刻调整至目标采样间隔, 更迅速地适应了信号变化速率。在极值点附近, 信号值趋近平稳, DSI增大了采样间隔, 导致信息进一步丢失; FDSI则比较准确地采集到极值点信息, 也并未错误地延长采样间隔。在信号平稳之后, DSI存在多次冗余采样, 缓慢调整到目标采样间隔; FDSI只有两次冗余采样便调整到目标

采样间隔。

分析幅值变化速率对采样策略的影响, 计算  $h$  分别为4、8、16、32、64、128时两种策略的冗余采样率和平均偏移量。其中冗余采样率考量的区间为  $[0, 110]$ , 平均偏移量考量的区间为  $[30, 24\pi - 10]$ , 即从第一次捕捉到信号变化的时刻至信号恢复稳态的时刻。用Matlab中的三次多项式插值得到冗余采样率和平均偏移量随信号变化速率变化的曲线。如图1—图3所示。

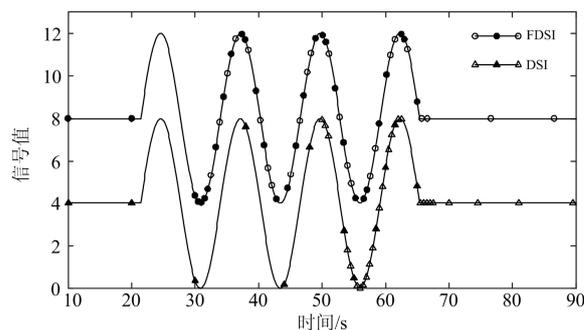


图1  $h=4$ 时FDSI和DSI采样结果比较图

Fig. 1 Comparison diagram of FDSI and DSI sampling results at  $h=4$

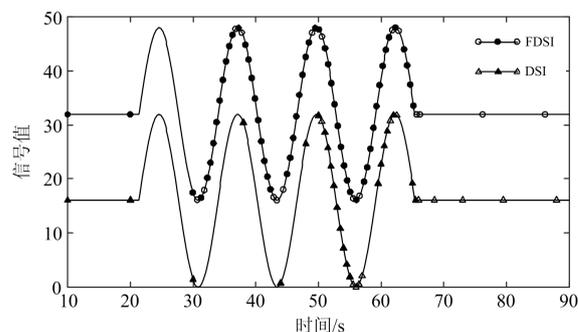


图2  $h=16$ 时FDSI和DSI采样结果比较图

Fig. 2 Comparison diagram of FDSI and DSI sampling results at  $h=16$

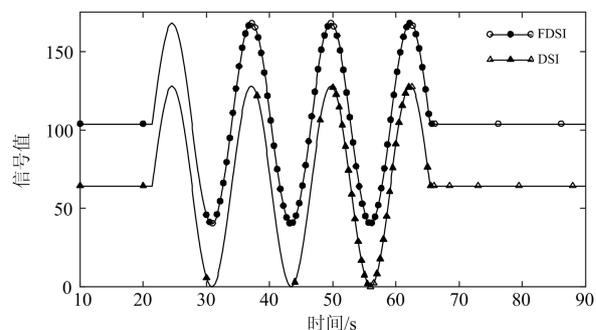


图3  $h=64$ 时FDSI和DSI采样结果比较图

Fig. 3 Comparison diagram of FDSI and DSI sampling results at  $h=64$

由图4可以看出，两种策略的冗余采样率都随着信号变化速率加快而降低，但FDSI的冗余采样率始终低于DSI的冗余采样率，并且在 $h$ 值较低时差值更大。这说明FDSI的无效采样更少。

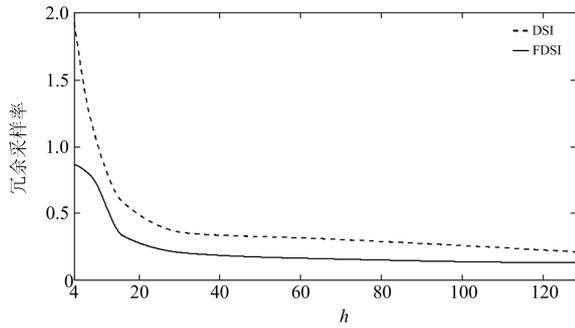


图4 冗余采样率随 $h$ 增加的变化

Fig. 4 Variation of redundant sampling rate with the increase of  $h$

由图5可以看出，DSI的平均偏移量随信号变化速率的加快而增大，FDSI的平均偏移量始终很低。这说明FDSI能更好地适应信号幅值变化，信息丢失率更低且不受一定范围内信号变化速率的影响，这个范围基本覆盖母线槽的极限温升。

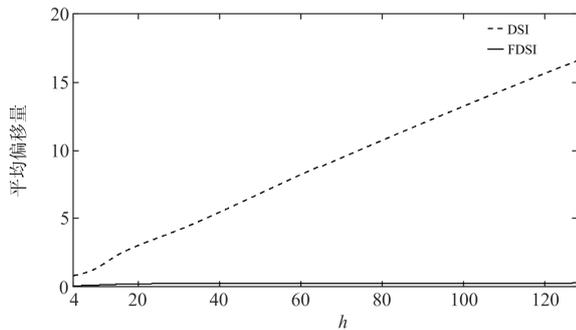


图5 平均偏移量随 $h$ 增加的变化

Fig. 5 Variation of mean deviation with the increase of  $h$

分析信号变化的持续时间对采样策略的影响，不考虑信号变化初始的信息丢失。选取 $h=32$ ，区间 $[10\pi-10, L]$ 作为信号变化的区间， $L$ 为信号变化结束的时刻。考虑到平均偏移量至少需要两个数据点，所以选取信号变化的持续时间为20 s、30 s、40 s、50 s、60 s、70 s，其中平均偏移量考察的区间为 $[30, L]$ 。使用Matlab中的三次多项式插值得到平均偏移量随信号持续时间变化的曲线。

由图6可以看出，DSI的平均偏移量随信号变化持续时间的增加而减少，因为其采样间隔调整速度较慢，越接近目标采样间隔，信息丢失率越低。FDSI的平均偏移量始终处于极低水平，几乎不受信号变化持续时间的影响，这对于母线槽温升持续时间的不可知性是有利的。

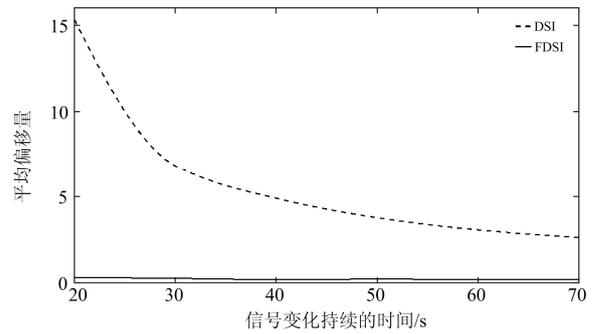


图6 平均偏移量随信号变化持续时间的变化

Fig. 6 Variation of mean deviation with the duration of the signal change

分析不同阈值 $\Delta$ 对采样策略的影响。选取 $h=g=32$ ，冗余采样率考量的区间为 $[0,110]$ ，平均偏移量考量的区间为 $[30, 24\pi-10]$ 。阈值 $\Delta$ 从1开始以公差为2的等差数列取值。

由图7可以看出，在 $\Delta$ 较小时，FDSI的冗余采样率低于DSI，在 $\Delta=8(h$ 的25%)附近及之后，FDSI大于DSI；在 $\Delta=11(h$ 的34%)之后，DSI的冗余采样率几乎不变，而在 $\Delta=15(h$ 的47%)时FDSI的冗余采样率大幅增加。由图8可以看出，在 $\Delta=15$ 之前，FDSI的平均偏移量明显小于DSI，但在 $\Delta=15$ 之后大幅增

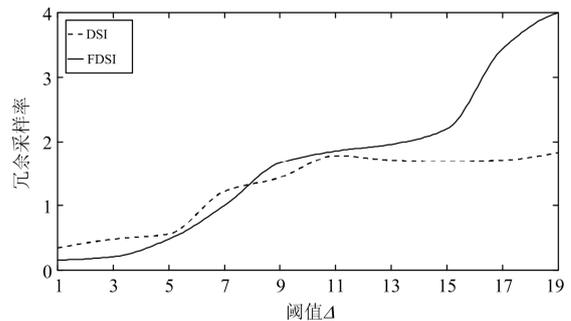


图7 冗余采样率随阈值增加的变化

Fig. 7 Variation of redundant sampling rate with the increase of threshold

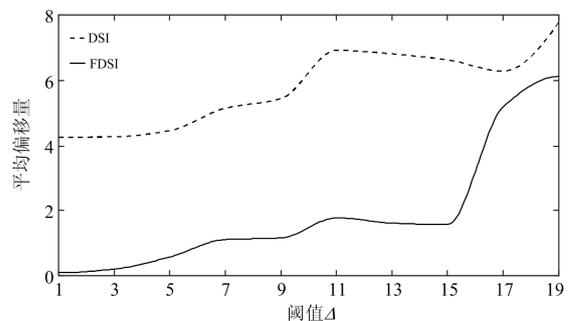


图8 平均偏移量随阈值增加的变化

Fig. 8 Variation of mean deviation with the increase of threshold

加, 接近于DSI的平均偏移量。 $\Delta$ 的值只会影响上传数据的频率, 不会影响采样间隔的调整。脱离信号变化范围讨论阈值是没有意义的, 实际应用需要根据母线槽的温升变化范围和采集要求设计阈值。总之, 当阈值 $\Delta$ 小于信号幅值单方向变化范围的25%时, FDSI的信息丢失和冗余采样均低于DSI。

## 6 结论

母线槽温升的幅值变化及其持续的时间具有较强的随机性, DSI适应信号变化的速度过慢, 不利于该类型信号的采集。改进后的策略FDSI将采样间隔缓慢调整的过程转变为直接映射到某一集合, 映射规则根据母线槽温升信号的特点制定, 提高了对母线槽温升信号的适应速度; 增加极值点判断环节, 降低了极值点对采样间隔调整的干扰。通过仿真比较说明, 在阈值合适的条件下, FDSI比DSI对于信号幅值变化的适应性更强, 信息丢失率更低, 并且基本不受信号变化速度和持续时间的影响, 冗余采样也更少, 适用于母线槽温升信号的采样。

## 参考文献

- [1] 范京艺, 毛安家, 刘岩, 等. 基于负荷和环境温度曲线的输电断面短时过载能力分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 116-121.  
FAN Jingyi, MAO Anjia, LIU Yan, et al. Analysis of the short-time overload capability of the transmission section based on the load and ambient temperature curve[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 116-121.
- [2] 周旋, 陈林海, 高强权, 等. 封闭母线接头温度场反演[J]. 电源技术, 2016, 40(2): 373-376.  
ZHOU Xuan, CHEN Linhai, GAO Qiangquan, et al. Estimation of temperature field for enclosed bus-bar[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(2): 373-376.
- [3] 宁宇, 孙洪宇, 张伟, 等. GIS 高压母线段间连接缝隙造成的过热分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊 1): 217-224.  
NING Yu, SUN Hongyu, ZHANG Wei, et al. Overheat analysis on the connection gap in gis with the sections connected by bolts[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 217-224.
- [4] 梁云, 黄莉, 胡紫巍, 等. 面向未来智能配用电的信息物理系统: 技术、展望与挑战[J]. 供用电, 2018, 35(3): 2-9.  
LIANG Yun, HUANG Li, HU Ziwei, et al. Cyber physical systems in future smart power distribution and utilization: technologies, prospects and challenges[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(3): 2-9.
- [5] 张俊民, 侯振华, 张春朋, 等. 27.5 kV GIS 母线室三维温度场的数值计算[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 62-67.  
ZHANG Junmin, HOU Zhenhua, ZHANG Chunpeng, et al. Three dimensional thermal field numerical calculation of 27.5 kV gas-insulated switchgear bus bar's cabinet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 62-67.
- [6] 孙国霞, 舒乃秋, 吴晓文, 等. 基于多物理场耦合的气体绝缘母线触头接触温升有限元计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28(增刊 2): 408-413.  
SUN Guoxia, SHU Naiqiu, WU Xiaowen, et al. Finite element analysis of contact temperature rise in gas insulated busbars based on coupled multi-physics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S2): 408-413.
- [7] 华煌圣, 甘霖, 伍竹林, 等. 基于物联网技术的能源互联网数据支撑平台[J]. 供用电, 2018, 35(1): 40-45.  
HUA Huangsheng, GAN Lin, WU Zulin, et al. Data platform of energy internet based on techniques of internet of things[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(1): 40-45.
- [8] 邢晓敏, 李波, 陈静. 电力高压触点温度无线监测系统的研发[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 174-178.  
XING Xiaomin, LI Bo, CHEN Jing. Development of wireless monitoring system for power high voltage contacts' temperature[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 174-178.
- [9] 黄新波, 张杰, 田毅, 等. 风热母线槽热故障状态监测系统[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 130-137.  
HUANG Xinbo, ZHANG Jie, TIAN Yi, et al. On-line monitoring system for wind power busbar trunk heat fault status[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 130-137.
- [10] 陈创, 徐恺, 王颖韬, 等. 基于 MLX90614 的非接触式母线温度在线监测系统[J]. 现代电子技术, 2015, 38(12): 105-109.  
CHEN Chuang, XU Kai, WANG Yingtao, et al. MLX90614-based non-contact online temperature monitoring system for switch cabinet busbar[J]. Modern Electronics Technique, 2015, 38(12): 105-109.
- [11] 王晶, 张金波, 邵通广. 基于 WSN 的母线温度槽温升在线监测系统设计[J]. 微处理机, 2014(1): 93-96.  
WANG Jing, ZHANG Jinbo, SHAO Tongguang. Design of busway temperature online monitoring system based on WSN[J]. Microprocessors, 2014(1): 93-96.
- [12] 郭其勇, 陈彩莲, 李飞. 一种智能母线槽在线监测系统的解决方案[J]. 新技术新工艺, 2016(11): 20-22.  
GUO Qiyong, CHEN Cailian, LI Fei. A monitoring system

- solution to busbar[J]. *New Technology & New Process*, 2016(11): 20-22.
- [13] 刘琦, 程春, 吴健, 等. 智能变电站温度监测主站系统的设计与实现[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(4): 130-135.  
LIU Qi, CHENG Chun, WU Jian, et al. Design and implementation of temperature monitoring system for intelligent substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(4): 130-135.
- [14] 王长清, 王昊. 基于 Zigbee 的自供高压母线无线温度监测系统[J]. *电测与仪表*, 2015, 52(7): 101-105.  
WANG Changqing, WANG Hao. Design of wireless temperature monitoring system for self-powered high voltage bus based on Zigbee technology[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2015, 52(7): 101-105.
- [15] 郭学梅. 基于 ZigBee 的变压器在线监测系统[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(1): 167-169.  
GUO Xuemei. The design of online monitoring system about zigbee-based transformer[J]. *Journal of Henan Normal University(Natural Science)*, 2010, 38(1): 167-169.
- [16] REKHA P, RAMESH M V, RANGAN B P, et al. Energy efficient data acquisition techniques using context aware sensing for landslide monitoring systems[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(18): 6006-6018.
- [17] 杨明霞, 王万良, 邵鹏飞. 基于时间序列的自适应采样机制策略研究[J]. *计算机科学*, 2015, 45(7): 162-164.  
YANG Mingxia, WANG Wanliang, SHAO Pengfei. Adaptive sampling algorithm based on TCP congestion strategy[J]. *Computer Science*, 2015, 45(7): 162-164.
- [18] 赵意, 陈晓. 基于感知网格的无线传感器网络动态采样策略[J]. *传感器与微系统*, 2016, 35(1): 22-24.  
ZHAO Yi, CHEN Xiao. Dynamic sampling strategy for wireless sensor networks based on sensing grid[J]. *Transducer and Microsystem Technoligise*, 2016, 35(1): 22-24.
- [19] CHEN Z, RANIREI J, ZHANG R, et al. DASS: distributed adaptive sparse sensing[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2015, 14(5): 2571-2583.
- [20] KOLO J, SHANMUGM S A, LIM D W G, et al. Fast and efficient lossless adaptive compression scheme for wireless sensor networks[J]. *Computer & Electrical Engineering*, 2015, 41: 275-287.
- [21] HAO Jie, ZHANG Baoxian, JIAO Zhenzhen, et al. Adaptive compressive sensing based sample scheduling mechanism for wireless sensor networks[J]. *Pervasive and Mobile Computing*, 2015, 22: 113-125.
- [22] PIAO Xinglin, HU Yongli, SUN Yanfeng, et al. Correlated spatio-temporal data collection in wireless sensor networks based on low rank matrix approximation and optimized node sampling[J]. *Sensors*, 2014, 14(12): 23137-23158.
- [23] 宋洋, 黄志清, 张严心, 等. 基于压缩感知的无线传感器网络动态采样方法[J]. *计算机应用*, 2017, 37(1): 183-187.  
SONG Yang, HUANG Zhiqing, ZHANG Yanxin, et al. Dynamic sampling method for wireless sensor network based on compressive sensing[J]. *Journal of Computer Applications*, 2017, 37(1): 183-187.
- [24] MESIN L, ARAM S, PASERO E. A neural data-driven algorithm for smart sampling in wireless sensor networks[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2014(1): 1-8.
- [25] 阚杰, 张瑞瑞, 陈立平, 等. 基于 BP 神经网络的传感器网络动态采样模型研究[J]. *计算机测量与控制*, 2015, 23(7): 2485-2487.  
KAN Jie, ZHANG Ruirui, CHEN Liping, et al. Dynamic sampling model research of sensor network based on bp neural network[J]. *Computer Measurement & Control*, 2015, 23(7): 2485-2487.
- [26] 张建军, 陈晓, 赵意. 一种无线传感器节点动态采样策略[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(2): 249-255.  
ZHANG Jianjun, CHEN Xiao, ZHAO Yi. Dynamic sampling control strategy for wireless sensor nodes[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(2): 249-255.

收稿日期: 2018-05-09; 修回日期: 2018-07-11

作者简介:

徐乔笙(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为检测技术与自动化装置; E-mail: 303996012@qq.com

谢维成(1973—), 男, 硕士, 教授, 研究方向为信号检测与控制、智能信息处理等。E-mail: scxweicheng@mail.xhu.edu.cn

(编辑 许威)