



文章编号:1001-9081(2018)08-2348-05

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2018010110

# 基于邻居节点预状态的无线传感器网络故障诊断算法

马梦莹<sup>1,2</sup>, 曾雅丽<sup>1,2</sup>, 魏甜甜<sup>1,2,3</sup>, 陈志德<sup>1,2\*</sup>

(1. 福建师范大学 数学与信息学院, 福州 350007; 2. 福建省网络安全与密码技术重点实验室(福建师范大学), 福州 350007;

3. 中国科学院信息工程研究所 中国科学院网络测评技术重点实验室, 北京 100093)

(\*通信作者电子邮箱 zhidechen@fjnu.edu.cn)

**摘要:**针对无线传感器网络(WSN)故障节点率高于50%时故障检测率降低的问题,提出一种基于邻居节点预状态及邻居节点数据的无线传感器节点故障诊断算法。首先利用节点自身历史数据对节点状态进行初步预判断;然后结合节点间相似性和邻居节点的预状态对节点状态进行最终的判断;最后利用移动传感器节点将故障节点信息通过最优路径发送给基站,有效地减少了通信次数。仿真实验在100 m×100 m的方形区域内模拟WSN。实验结果表明,与传统的分布式故障诊断(DFD)算法相比,诊断精度提升了9.84个百分点,并且当节点故障率高达50%时,该算法仍能达到95%的诊断精度。在实际应用中,所提算法在提高故障诊断精度的同时,能有效地减少能量消耗、延长网络寿命。

**关键词:**无线传感器网络;故障诊断;时空相关性;移动传感器;最优路径选择

**中图分类号:** TP393    **文献标志码:**A

## Fault diagnosis algorithm of WSN based on precondition of neighbor nodes

MA Mengying<sup>1,2</sup>, ZENG Yali<sup>1,2</sup>, WEI Tiantian<sup>1,2,3</sup>, CHEN Zhide<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Mathematics and Informatics, Fujian Normal University, Fuzhou Fujian 350007, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Network Security and Cryptology (Fujian Normal University), Fuzhou Fujian 350007, China;

3. Key Laboratory of Network Assessment Technology of CAS (Institute of Information Engineering), Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

**Abstract:** To address the problem of low detection accuracy when the fault node rate was higher than 50% in Wireless Sensor Network (WSN), a wireless sensor fault diagnosis algorithm based on the precondition of neighbor nodes and neighbor node data was proposed. Firstly, the historical data of nodes were used to pre-calculate the states of sensor nodes initially. Then the final state of each node was judged by taking advantage of similarity of nodes and pre-states of neighbor nodes. Finally, the fault node information was sent to the base station by mobile sensors through the optimal path, which effectively reduced the number of communications. A WSN was simulated in an area of 100 m \* 100 m. The experimental results show that compared with the traditional Distributed Fault Detection (DFD) algorithm, the diagnosis accuracy of the proposed algorithm is improved by 9.84 percentage points. Moreover, the proposed algorithm even achieves more than 95% fault diagnosis accuracy when the node failure rate is as high as 50% in the network. In practical application, the proposed algorithm improves the fault diagnosis accuracy, reduces the energy consumption effectively, and prolongs the network lifetime as well.

**Key words:** Wireless Sensor Network (WSN); fault diagnosis; spatiotemporal correlation; mobile sensor; optimal route selection

## 0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由一组传感器以Ad Hoc方式组成的网络。无线传感器节点具有数据采集和数据处理功能,能够被投放到各种地方进行实时感知、采集数据,并将数据传输给网络管理者。网络管理者对接收到的数据进行分析,从而得到有用的信息,更好地完成远程监控、调配等操作。随着技术的进步,无线传感器节点以其价格低廉、体积较小等特点,被广泛地应用到医疗救护、农业检测、国防作战等各种领域。

由于无线传感器节点一般部署在较恶劣的环境中,极易

发生故障,导致监测数据无法进行传输或监测的数据有误。管理者对错误的数据进行分析,无法作出正确的决策,导致一系列无法估计的连锁反应,因此对无线传感器节点进行故障检测至关重要。

现有的传感器节点故障检测算法一般分为集中式故障检测<sup>[1]</sup>和分布式故障检测<sup>[2]</sup>两大类。在集中式故障检测算法中,节点将自身的监测数据通过汇聚节点传输到基站,基站接收到信息后根据节点间数据的相似性在线对传感数据进行分类,从而实现节点的故障诊断;在分布式故障检测算法中,所有节点处于同样的地位,节点通过自身监测数据进行故障诊断,不需要将传感数据传输到基站,减少能量的消耗,延长网

收稿日期:2018-01-15;修回日期:2018-03-10;录用日期:2018-03-16。    基金项目:福建省自然科学基金资助项目(2016J0101)。

作者简介:马梦莹(1994—),女,河南息县人,硕士研究生,主要研究方向:网络与信息安全;曾雅丽(1990—),女,福建漳州人,博士研究生,主要研究方向:网络与信息安全;魏甜甜(1992—),女,河南平顶山人,硕士研究生,主要研究方向:网络与信息安全;陈志德(1976—),男,福建泉州人,教授,博士,主要研究方向:网络安全与密码学、分布式计算。



络寿命。

常见的分布式故障检测算法主要分为两种:一种是基于传感器节点历史数据进行故障检测,通过比较预测数据与真实值之间的差值来进行故障诊断。当节点发生永久性故障时,基于传感器节点历史数据进行故障诊断的算法精度会下降。另一种是基于传感数据的时空相关性进行故障诊断。文献[3-7]中通过对比同一时刻待测节点的数据和邻居节点数据来进行故障检测;文献[8-9]使用加权中值的分布式无线传感器节点故障诊断算法,是分布式检测算法的改进,通过对传感器节点数据的加权处理,提高故障诊断精度;文献[10]使用分簇的方法对数据进行划分,划分后在每个簇中选取一个簇头节点对簇内节点进行诊断,减少节点间的通信,降低了能量的消耗。

文献[11-13]使用神经网络算法,通过机器学习对数据进行分类,从而得到故障节点。该方法需要大量的历史数据,且进行模型训练的数据需要包含所有的数据类型,否则会导致节点检测率降低。

本文提出了一种新的故障诊断算法,假设每个节点都有一定数目的邻居节点,通过综合邻居节点数据和节点历史数据进行故障诊断。该算法首先利用节点历史数据对节点状态进行初步预测,再结合其邻居节点的初始状态和邻居节点数据对节点状态作最终的判断。当网络中故障节点数较多时,仍能达到较高的故障诊断精度,并且在诊断过程中对状态确定正常的节点进行状态扩散,通过移动传感器寻找最优路径将节点状态反馈给基站,减少了节点间的通信次数,降低了节点的能量损耗。

## 1 模型

无线传感器节点由传感器模块、CPU模块、无线通信模块和电源模块组成。传感器节点被随机地部署在待检测的特定区域内,节点间以自组织的形式连接成网络。无线传感器网络可表示为无向图  $G(v, e)$ ,其中: $G(v)$  是传感器节点的集合, $G(e)$  是无线网络中边的集合。若  $e_{ij} \in G(e)$ ,则表明节点  $i, j$  之间可以相互通信。节点间能否相互通信取决于节点间的欧几里得距离。设传感器节点  $i, j$  在监测区域的位置坐标分别为  $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ , 节点  $i, j$  之间的欧几里得距离  $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ 。当  $d_{ij}$  小于或等于传感器节点的传输范围  $T(r)$  时,则说明  $e_{ij} \in G(e)$ ,且在无线传感器网络中,  $e_{ij} \in G(e)$  则  $e_{ji} \in G(e)$ 。网络中的节点可以通过多跳节点与基站相互连接,将数据信息传输到基站以便管理人员进行分析。

无线传感器节点故障大体上可以分为硬故障和软故障。硬故障是指传感器节点发生硬件故障,不能进行数据采集和通信;软故障是指传感器节点能够进行数据采集,通信功能也正常,但采集到的数据有误。本文主要探究无线传感器节点软故障的检测。

### 1.1 状态判断

由于无线传感器节点采集的数据具有时空相关性,即在相邻的一段时间内无故障的无线传感器节点所采集的数据是相似的,且会随着时间的变化而变化;而发生软故障的节点所采集的数据则是随机的、无序的,与正常节点采集的数据有一定的偏差。本文主要考虑如下所述的四种类型的故障:

1) 偏移故障。偏移故障是指采集的数据中连续多个数据的变化率不在正常范围内,但其值仍随时间、环境的变化而变化。

2) 固定值故障。节点采集的数据是一个常数,不会随时间或环境的变化而变化。

3) 间歇性故障。节点采集的数据一般都在正常值之间,但会有连续几个时刻的数据远大于或小于正常值。

4) 瞬时故障。节点采集的数据在某一瞬间出现异常,而其他时刻的数据都是正常的。其中,由于瞬时故障节点的数据只在那一瞬间出错,之后会恢复正常,因此瞬时故障节点不作故障节点考虑。

本文提出的算法根据节点的历史数据计算出每个节点的可能状态,即对节点进行状态预判断,预判断流程如图1所示。

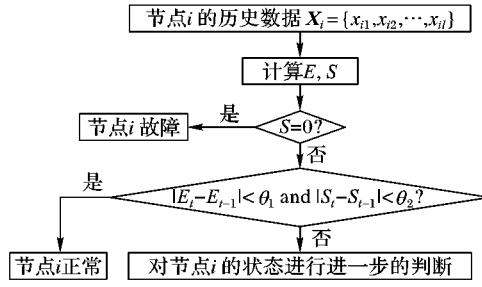


图1 节点状态预判断流程

Fig. 1 Flow chart of precondition of node state

假设每个节点都可以存储  $l$  个时刻的数据,则节点  $i$  的状态的预判过程如下。

设节点  $i$  存储  $l$  个历史数据  $X_i = (x_i^{t-l}, x_i^{t-l+1}, \dots, x_i^{t-1})$ , 对  $l$  个历史数据进行如下计算:

$$E = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l x_i^{t-k} \quad (1)$$

$$S^2 = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l (x_i^{t-k} - \bar{x}_i)^2 \quad (2)$$

当  $S^2 = 0$  时,说明节点  $i$  发生固定值故障,此时令  $T_i = 1$ 。设定阈值  $\theta$ ,当  $S^2 \leq \theta$  时,判定节点状态为可能正常,记作  $PT_i = 0$ ;否则节点状态为可能故障,记作  $PT_i = 1$ 。

对预判中状态无法确定的节点进行进一步的诊断,找到节点中邻居节点数最大的节点,对邻居节点数最大的节点优先进行进一步的状态判断。

对选定的根节点  $i$ ,若直接利用节点的一跳邻居节点的历史数据进行检测,当邻居节点故障数较多时,误检率较大。为了准确判断节点  $i$  的状态,本文基于节点的邻居节点  $j$  的预判状态来进行节点  $i$  状态的准确判断(如图2所示)。

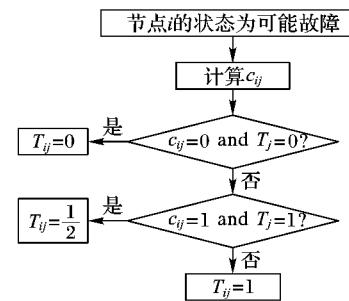


图2 节点状态判断流程

Fig. 2 Flow chart of node state judgment

设节点  $j$  在时刻  $t$  之前的  $l$  个感测数据为:  $X_j = (x_j^{t-l}, x_j^{t-l+1}, \dots, x_j^{t-1})$ ,  $\bar{x}_j = \frac{1}{l} \sum_{n=t-l}^{t-1} x_j^n$ , 计算:

$$\sigma^2 = \frac{1}{l} \sum_{n=t-l}^{t-1} (x_j^n - \bar{x}_j)^2 \quad (3)$$



设定阈值  $\theta_1$ , 当  $0 < \sigma^2 < \theta_1$  时, 判定节点  $j$  的状态为可能正常, 记作  $PT_j = 0$ ; 否则节点  $j$  的状态为可能故障, 记作  $PT_j = 1$ 。确定节点  $j$  的可能状态后, 节点  $j$  将自身在  $t$  时刻的数据  $x_j^t$  和可能状态  $T_j$  发送给根节点  $i$ , 节点  $i$  根据接收到的信息计算:

$$c_{ij} = \begin{cases} 0, & |x_i^t - x_j^t| < \theta' \\ 1, & |x_i^t - x_j^t| \geq \theta' \end{cases} \quad (4)$$

$c_{ij}$  表示两个节点数据的相似性,  $c_{ij} = 1$  表示两节点数据相差较大;  $c_{ij} = 0$  表示两节点数据相似。结合节点  $j$  的预判状态和节点  $i, j$  的相似性, 最终判断节点  $i$  的准确状态。节点  $i$  的状态判定可分为四种情况, 具体判断过程如下:

$$T_{ij} = \begin{cases} 0, & T_j = 0 \text{ and } c_{ij} = 0 \\ 1, & T_j = 0 \text{ and } c_{ij} = 1 \\ 1, & T_j = 1 \text{ and } c_{ij} = 0 \\ 0.5, & T_j = 1 \text{ and } c_{ij} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

其中  $T_{ij} = 1/2$  时, 节点  $i$  的状态可能正常也可能为故障, 无法判断, 此时根据  $T_{ij} = 1$  与  $T_{ij} = 0$  的个数来对节点  $i$  的最终状态进行判定。

$$T_i = \begin{cases} 0, & \sum_{j \in N(s_i)} (1 - T_{ij}) > \sum_{j \in N(s_i)} T_{ij} \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

由此, 可准确判断节点  $i$  的真实状态。

## 1.2 状态扩散

对状态检测为正常的节点, 利用节点的时空相关性, 可以将正常节点的状态进行扩散。节点部署如图 3 所示, 其中: 圆圈代表节点, 黑色节点表示选取的正常节点, 两点之间的线段表示两节点能够通信, 大的圆圈代表节点的通信范围。

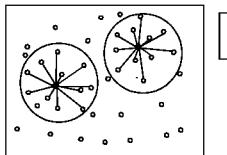


图 3 节点部署示意图

Fig. 3 Schematic diagram of nodes deployment

状态扩散减少了节点之间的通信和计算次数, 具体步骤如下:

- 1) 正常节点将“自己的状态”以信息包的形式发送给它的所有邻居节点。
- 2) 邻居节点接收到发送的信息包后, 根据已经计算的  $c_{ij}$  值来作进一步判断: 当  $c_{ij} = 0$  时, 节点  $j$  的状态为正常, 即  $T_j = 0$ ; 若  $c_{ij} = 1$ , 则节点  $j$  的状态为故障, 即  $T_j = 1$ 。即:

$$T_j = \begin{cases} 0, & T_i = 0 \text{ and } c_{ij} = 0 \\ 1, & T_i = 0 \text{ and } c_{ij} = 1 \end{cases} \quad (7)$$

3) 状态正常的邻居节点按照第 1) 步继续进行状态扩散, 而状态为故障的节点则不进行状态扩散。

- 4) 重复上述步骤, 直至节点状态全部检查出来。

算法流程如图 4 所示。

当无线传感器网络中的节点分布比较稀疏时, 在故障检测过程中, 没有邻居节点或邻居节点数较少时, 节点的状态只能由节点自身历史数据进行判断。

## 2 故障反馈

上文中已经诊断出状态为故障的传感器节点, 下一步则需要将传感器节点的故障信息发送给基站, 让管理人员知道

节点故障情况, 以便对故障节点采取相应的修复措施。

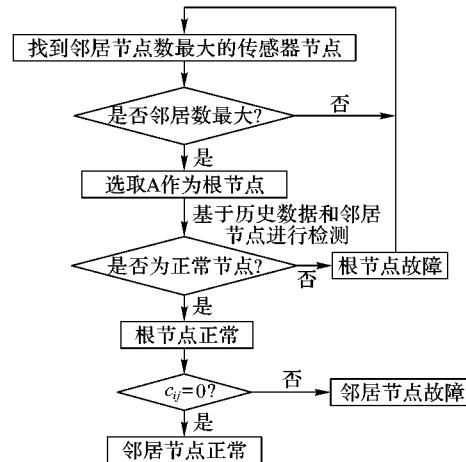


图 4 状态扩散流程

Fig. 4 Flow chart of state proliferation

若每个节点都与基站进行通信, 则距离基站较远的节点需要借助多跳节点与基站进行通信, 这会增加传感器节点能量的消耗而且在传输过程中容易出错。为了避免这一问题, 文献[14]提出在故障反馈阶段, 在检测区域设置一个移动传感器节点, 移动传感器节点从基站出发, 通过移动来收集所有传感器节点的状态信息并传输给基站。

由于无线传感器节点有一定的通信范围, 因此在进行故障反馈时不需要遍历每一个传感器节点, 首先可以先将传感器节点所在区域进行划分, 然后令移动传感器节点遍历每一个小区域即可。

### 2.1 划分节点区域

在对节点进行划分时, 通过计算所有节点的邻居节点数来划分, 具体步骤如下:

1) 计算所有节点的邻居节点数, 挑选邻居节点数最多的节点作为根节点, 该根节点收集其邻居节点的所有状态信息, 划成一个区域。

2) 将已划分的上述节点剔除, 继续计算剩余传感器节点的邻居节点数, 挑选邻居节点数最多的节点作为根节点, 该根节点收集其邻居节点的所有状态信息, 再划成一个区域。

依次经过上述方法将传感器节点所在区域划分成多个小的通信区域。

### 2.2 最优路径选择

对检测区域划分后, 列出这些区域的根节点坐标, 将这些根节点的坐标看作是新的节点, 使移动传感器节点遍历所有的根节点。为了节省能量, 移动传感器节点的移动距离要求是最小的, 即等同于最短路径问题。

问题的目标函数是:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^n c_{ij} e_{ijt} \quad (8)$$

满足如下约束条件:

$$\begin{cases} \sum_i \sum_j e_{ijt} = 1, & t = 1, 2, \dots \\ \sum_j \sum_i e_{ijt} = 1, & i = 1, 2, \dots \\ \sum_i \sum_t e_{ijt} = 1, & j = 1, 2, \dots \\ \sum_i e_{ijt} = \sum_k e_{jkt}, & j, i = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (9)$$

其中:



$$e_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{经过边 } e_{ij} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

$e_{ij}$  表示从节点  $i$  到节点  $j$  的花费, 可以运用线性规划进行求解。

### 3 仿真与分析

通过 Python 软件对无线传感器网络的节点故障检测算法进行仿真, 并对其结果进行分析。

仿真实验中, 将 500 个传感器节点随机部署在  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  的区域内, 所有的传感器节点具有相同的传输距离, 并分别模拟网络节点故障率  $p$  为  $0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$  时节点检测的状况。

#### 3.1 准确性分析

为了衡量故障检测算法的好坏, 在无线传感器网络中定义了节点故障检测率、节点故障虚警率。

在无线传感器网络  $G = (V, E)$  中, 正常态节点的集合为  $V_N$ , 故障节点的集合  $V_F$ , 准确诊断出故障的节点集合  $V_{TF}$ , 将状态为正常的节点诊断为故障的节点集合  $V_{NF}$ 。

1) 节点故障检测率(Detection Rate, DR):

$$DR = |V_{TF}| / |V_F| \quad (11)$$

2) 节点故障虚警率(False Alarm Rate, FAR):

$$FAR = |V_{NF}| / |V_N| \quad (12)$$

将基于邻居节点状态的无线传感器节点故障检测(fault diagnosis of WSN based on Precondition of Neighbor Nodes, PNN) 算法与传统的分布式故障诊断(Distributed Fault Detection, DFD) 算法和改进的分簇式故障算法(Distributed Energy Efficient Clustering-Reactive Distributed Fault Detection, DEEC-RDFD)<sup>[15]</sup> 进行比较, 结果如图 5 所示。

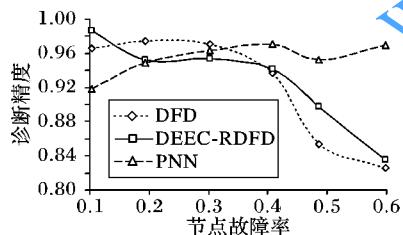


图 5 三种算法在不同故障率下的诊断精度对比

Fig. 5 Diagnosis accuracy comparison of three algorithms under different fault probability

从图 5 中可以看出, 随着节点故障率的增高, DFD 和 DEEC-RDFD 算法的节点故障诊断率呈现出不同程度的降低, 而 PNN 算法的故障诊断率呈上升趋势。这是由于传统的 DFD 算法和 DEEC-RDFD 算法在节点的邻居节点故障数超过一半时会对节点状态作出错误诊断; 而 PNN 算法结合了节点自身的历史数据和邻居节点数据, 首先利用节点自身数据对节点状态进行预判断, 判断出每个节点的可能状态, 然后对节点进行划分, 利用节点与邻居节点的空间相关性和邻居节点自身可能状态对节点状态进行准确判断, 且基于节点历史数据进行预测来诊断节点状态时, 由于当节点出现固定值故障时会出现误诊现象, 而结合邻居节点数据, 在节点出现固定值故障且故障率高达 50% 的场景中, 该算法也能够准确检测节点的状态, 提高故障诊断的精确度。

本文在将状态确定正常的节点的状态进行扩散时, 并不是直接将两个节点  $i, j$  当前时刻  $t$  的测量值  $x_i, x_j$  进行比较, 而是对最近一段时间的两个节点的测量值  $x_i, x_j$  进行比较, 相

比其他算法中只对当前测量值进行比较, 避免了数据的偶然性, 降低了将瞬时故障节点诊断为故障节点的可能性, 进一步提高了故障检测精度。

图 6 是故障虚警率随节点故障率增大的变化趋势: 当节点故障率增大时, DFD 和 DEEC-RDFD 的虚警率都急剧上升, 而基于邻居节点状态的无线传感器故障诊断算法的虚警率增长幅度较小; 当节点故障率低于 30% 时, 三种算法的虚警率都低于 1%, 但当节点故障率高达 60% 时, PNN 算法的虚警率只有 5%, 比 DEEC-RDFD 低 10 个百分点。可以看出, 本文提出的基于邻居节点预状态的无线传感器故障诊断算法有更好的结果。

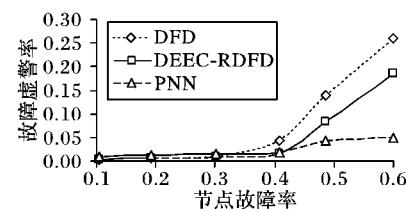


图 6 三种算法在不同故障率下的虚警率

Fig. 6 False alarm rate comparison of three algorithms under different fault probability

#### 3.2 能耗分析

在无线传感器网络中, 部署的节点能量都是有限的, 在进行故障诊断的过程中最重要的是尽可能减少能量的消耗, 延长无线传感器网络的寿命。而在无线传感器网络中, 相比节点间相互通信所消耗的能量, 计算所消耗能量可忽略不计。

三种故障诊断算法在进行节点故障诊断时, 节点间的通信次数基本相近。首先节点都需要和邻居节点进行信息交换来确定自身状态, 再将状态正常的节点进行状态扩散, 确定其邻居节点状态。但传统的 DFD 算法和 DEEC-RDFD 算法在将节点故障信息反馈给基站时需要通过多跳节点进行传输, 尤其当故障节点距离基站较远且节点故障率过高时, 节点间需要进行多次通信, 消耗大量能量; 而本文的故障诊断算法在将节点状态传送到基站时, 使用移动传感器通过最优路径进行收集, 不需要通过多跳传输, 能有效减少网络中节点间的通信, 延长网络寿命。

### 4 结语

本文提出了一种基于邻居节点预诊断状态的无线传感器网络节点故障诊断的方法。网络中的每个节点首先根据时间相关性的特点, 通过对传感器节点历史数据的处理, 对传感器节点的状态进行初步诊断, 再根据节点间的空间相关性原理, 通过与邻居节点所感知的数据进行比较, 从而确定节点的最终状态, 并将测试状态为正常的节点的状态向网络中其他节点进行扩散。当节点出现固定值故障、瞬时故障和故障率过高时, 本文方法都能取得很好的诊断率。仿真结果表明, 本文所提出的故障诊断算法有效地减少了节点间的通信代价和能量消耗, 从而延长了无线传感器网络的生存周期。

#### 参考文献 (References)

- [1] 姜旭宝, 李光耀, 连朔. 基于变宽直方图的无线传感器网络异常数据检测算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(3): 694–697. (JIANG X B, LI G Y, LIAN S. Outlier detection algorithm based on variable-width histogram for wireless sensor network [J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(3): 694–697.)
- [2] 徐小龙, 耿卫建, 杨庚, 等. 分布式无线传感器网络故障检测算法综述[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(12): 4420–4425. (XU X L, GENG W J, YANG G, et al. Survey of distributed wireless sensor network fault detection algorithm [J]. Journal of Computer Application Research, 2012, 29(12): 4420–4425.)



- GENG W J, YANG G, et al. Survey of distributed fault detection algorithms for wireless sensor networks [J]. Application Research of Computers, 2012, 29 (12): 4420 – 4425.)
- [3] 季赛, 袁慎芳, 吴键, 等. 基于时空特性的无线传感器网络节点故障诊断方法[J]. 传感器与微系统, 2009, 28 (10): 117 – 120. (JI S, YUAN S F, WU J, et al. Fault detection for wireless sensor networks nodes based on spatial correlation and time redundancy [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28 (10): 117 – 120.)
- [4] 陈新颜. 基于邻居协作的无线传感器网络故障检机制[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015: 14 – 31. (CHEN X Y. Fault detection mechanism based on neighborhood-collaboration for wireless sensor networks [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015: 14 – 31.)
- [5] CHANG L, HUANG Z Q, ZHANG Y X. An improved distributed fault diagnosis algorithm in wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks. Paris: Atlantis Press, 2017: 646 – 651.
- [6] 蒋鹏. 一种改进的 DFD 无线传感器网络节点故障诊断算法研究 [J]. 传感技术学报, 2008, 21(8): 1417 – 1421. (JIANG P. Research on an improved distributed fault detection algorithm for node failure diagnosis in wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(8): 1417 – 1421.)
- [7] JIN M J, QU Z W. Efficient neighbor collaboration fault detection in WSN [J]. Journal of China Universities of Posts & Telecommunications, 2011, 18(1): 118 – 121.
- [8] 高建良, 徐勇军, 李晓维. 基于加权中值的分布式传感器故障检测[J]. 软件学报, 2007, 18(5): 1208 – 1217. (GAO J L, XU Y J, LI X W. Weighted-median based distributed fault detection for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2007, 18(5): 1208 – 1217.)
- [9] JI S, YUAN S, MA T, et al. Distributed fault detection for wireless sensor based on weighted average [C]// NSWCTC 2010: Proceedings of the 2010 Second International Conference on Networks Security Wireless Communications and Trusted Computing. Piscataway,
- NJ: IEEE, 2010: 57 – 60.
- [10] AKBARI A, DANA A, KHADEMZADEH A, et al. Fault detection and recovery in wireless sensor network using clustering [J]. International Journal of Wireless & Mobile Networks, 2011, 3(1): 130 – 138.
- [11] WU X, CHEN H, WANG Y, et al. BP neural network based continuous objects distribution detection in WSNs [J]. Wireless Networks, 2016, 22(6): 1917 – 1929.
- [12] SWAIN R R, KHILAR P M. Composite fault diagnosis in wireless sensor networks using neural networks [J]. Wireless Personal Communications, 2017, 95(3): 2507 – 2548.
- [13] 王军, 吕震中, 曹荃. 基于神经网络的传感器故障诊断方法与应用[J]. 自动化仪表, 2003, 24(10): 21 – 24. (WANG J, LYU Z Z, CAO Q. Neural network based method for transducer fault diagnostics and its application [J]. Process Automation Instrumentation, 2003, 24(10): 21 – 24.)
- [14] CHANAK P, BANERJEE I, SHERRATT R S. Mobile sink based fault diagnosis scheme for wireless sensor networks [J]. The Journal of Systems & Software, 2016, 119: 45 – 57.
- [15] ZHANG Y, YUAN X. Fault diagnosis in clustering WSN based on neighbor cooperation [C]// Proceedings of the 2016 Chinese Control and Decision Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 1803 – 1807.

This work is partially supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province (2016J0101).

**MA Mengying**, born in 1994, M. S. candidate. Her research interests include network and information security.

**ZENG Yali**, born in 1990, Ph. D. candidate. Her research interests include network and information security.

**WEI Tiantian**, born in 1992, M. S. candidate. Her research interests include network and information security.

**CHEN Zhide**, born in 1976, Ph. D., professor. His research interests include network security and cryptography, distributed computing.

(上接第 2305 页)

- [9] 文仁铁, 潘峰, 申军伟. 针对 MP3 压缩域比例因子的音频水印算法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(27): 58 – 62. (WEN R Y, PAN F, SHEN J W. Watermarking algorithm based on scalefactors in MP3 compression domain [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(27): 58 – 62.)
- [10] 曹军梅. 一种用于 MP3 文件版权保护的鲁棒水印算法[J]. 现代电子技术, 2016, 39(4): 6 – 8. (CAO J M. A robust watermarking algorithm for copyright protection of MP3 files [J]. Modern Electronic Technique, 2016, 39(4): 6 – 8.)
- [11] 朱奎龙, 侯丽敏. 抗解压缩/压缩攻击的 MP3 压缩域音频水印 [J]. 上海大学学报(自然科学版), 2008, 14(4): 331 – 335. (ZHU Q L, HOU L M. MP3 compression based watermarking capable of resisting decoding/re-coding attack [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2008, 14(4): 331 – 335.)
- [12] 曹强. 数字音频规范与程序设计——基于 Visual C ++ 开发 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 316 – 390. (CAO Q. Digital Audio Specification and Programming based on Visual C ++ [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012: 316 – 390.)
- [13] 黄昊, 郭立, 李琳. 用于 MP3 音频压缩的水印嵌入技术研究 [J]. 电子与信息学报, 2008, 30(11): 2678 – 2683. (HUANG H, GUO L, LI L. Audio watermarking for MP3 coding with low bitrate

and low sampling frequency [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(11): 2678 – 2683.)

[14] 张涛, 张彩霞, 高新意, 等. 自适应的混合域音频水印新算法 [J]. 信号处理, 2017, 33(6): 828 – 835. (ZHANG T, ZHANG C X, GAO X Y, et al. Adaptive audio watermarking algorithm in the hybrid domain [J]. Signal Processing, 2017, 33(6): 828 – 835.)

[15] 董亚坤. 基于 MP3 的信息隐藏技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015: 10 – 22. (DONG Y K. Research on information hiding based on MP3 [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015: 10 – 22.)

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (61403302), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (XJJ2016029).

**LI Chen**, born in 1981, Ph. D., lecturer. Her research interests include multimedia.

**WANG Kexin**, born in 1992, M. S. candidate. Her research interests include information security, audio watermarking.

**TIAN Lihua**, born in 1978, Ph. D., senior engineer. Her research interests include multimedia.