

应用于事件检测的无线传感器网络节点死活状态的研究

胡立琼¹ 舒 坚¹ 吴振华¹ 刘琳岚¹ 孙利民²

(南昌航空大学计算机学院 南昌 330063)¹ (中国科学院软件研究所 北京 100080)²

摘 要 针对应用于事件检测的无线传感器网络的特点,在大量实验的基础上,分析了单个节点因能量消耗而死亡的全过程;根据节点工作的受限程度定义了节点的亚死亡状态和死亡状态,提出一种基于 Heartbeat 机制的节点亚死亡状态检测方法。该方法采用邻居监测方法检测节点是否处于沉默期,并参考节点自测电压值与重启现象判断其是否进入了亚死亡状态。同时给出节点死亡的判断公式。实验表明,该方法是有用的,降低了误判,为事件检测无线传感器网络的实际应用提供了支持。

关键词 无线传感器网络,事件检测,节点死亡,节点亚死亡

中图法分类号 TP393.17 **文献标识码** A

Study on Node Dead & Alive States in Event-detection Wireless Sensor Networks

HU Li-qiong¹ SHU Jian¹ WU Zhen-hua¹ LIU Lin-lan¹ SUN Li-min²

(School of Computing, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)¹

(Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)²

Abstract Based on experiments, the paper analyzed power-exhausting process of a node in event-detection wireless sensor networks (WSN). It defined two states-dead state and alive state of a node, according to node work limitation. What is more, it proposed a detection method of node sub-death state based on heartbeat mechanism, which employs neighbor node monitoring method to detect if a node is on silent state. With the method, sub-death state was determined by voltage value and restart of a node. A formula of node death was presented. Experiment results show that the method is effective, and the rate or incorrect state judgment is reduced. It supports the applications of event-detection WSN.

Keywords Wireless sensor network, Event-detection, Node death, Node sub-death

事件检测是无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的典型应用类型之一。在无线传感器网络的事件检测型应用(如地震监测、森林防火、城市消防、动物运动跟踪、入侵检测和战场毒气检测等)中,由于人为或自然损坏、电池耗尽等原因,部署过程中和部署后的部分传感器节点不能正常工作,使得有些区域不能被传感器网络所覆盖,从而造成无线传感器网络不能及时准确地监测到突发事件的发生。为了维护无线传感器网络的正常运行,及时、准确地检测到突发事件,必须了解无线传感器网络的运行状态,对无线传感器网络自身健康状态进行实时监视,监视内容包括:节点是否已经不工作(死亡),节点的能量消耗、无线链路质量等局部状态,网络的能量分布、节点分布、通信状况等全局状态。无线传感器网络的网络状态是在单个节点的状态基础上获取,单个节点死活状态的检测是关键,它关系到网络能否正常运行、是否需要补充部署节点等关键问题。

目前,无线传感器网络中单个节点的死活状态检测一般采用传统分布式系统中的故障检测机制——All-to-all 的

Heartbeat 检测方式。采用该机制,每个节点定期发送 heartbeat 包到分组中的其他节点。在一定时间内未收到节点的 Heartbeat,则认为该节点死亡,这段时间被称为 Heartbeat Time-out(HTO)^[1]。由于通信丢包的普遍存在,无线传感器网络中 HTO 值的获取需要克服链路丢包的影响,通常取系统用户经验值或根据节点自身链路实际状况计算获得。

麻省理工学院提出了节点死活状态测量技术 Memento^[2]。在 Memento 中,设计了 Direct-heartbeat, Variance-bound 和 Empirical-CDF 3 种节点死亡的检测方法,给出了 HTO 的动态计算公式。每个节点内用位图表示其所有邻居的死活状态,并在全网按路由上传,直至 Sink 节点。在上传过程中,每个父节点对其子节点上传的位图信息进行融合。该方法未结合网络拓扑,融合的开销较大,尤其是靠近 Sink 的节点。

文献[3]提出了一种通过统计节点的通讯情况来识别节点故障的方法。每个节点建立邻居表并将其与收发包数、启动时间、拥塞情况等信息一起定期发送到网关。当被监测节

到稿日期:2008-10-28 返修日期:2009-01-24 本文受国家自然科学基金项目(60773055),航空基金项目(2006ZD56005),江西省自然科学基金项目(2007GZS1501),江西省研究生创新基金项目(YC08A087, YC2007014)资助。

胡立琼(1984—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络, E-mail: shujian@jxjt.gov.cn; 舒 坚(1964—),男,教授,硕士生导师,主要研究方向为无线传感器网络等; 吴振华(1977—),男,博士,讲师,主要研究方向为智能计算等; 刘琳岚(1968—),女,教授,硕士生导师,主要研究方向为嵌入式系统等; 孙利民(1966—),博士,研究员,主要研究方向为无线传感器网络等。

工作能力受到限制,但仍然能够工作,因此不能简单地将处于该阶段的节点看作死亡。然而,由于节点的工作状态不稳定,若采用 HTO 机制进行节点死亡的检测,易造成误判。

(2) 节点下一个阶段的状态为死亡。在能量彻底耗尽之前,节点的工作能力逐渐减弱。随着此阶段的深入,节点的工作能力无法满足事件检测的需要,此时节点的能量并没有彻底耗尽,但对于整个网络来说,该节点已死亡。

研究节点工作受限阶段的丢包率和工作能力,可以更准确地判断节点的死活状态。本文采用节点同一周期内工作时间与能量回复时间的比值 T_{wi}/T_n 度量节点工作受限阶段的工作能力, T_{wi}/T_n 越大,表明节点工作能力越强。

节点亚死亡状态、死亡状态的定义如下:

定义 1 定义节点从 T_i 开始到第 i 个节点周期 T_{ndei} (满足 $T_{wi}/T_n > P$) 之间的状态为亚死亡状态。

定义 2 定义节点从第 i 个节点周期 T_{ndei} (满足 $T_{wi}/T_n < P_{min}$) 开始的状态为死亡状态。

2.2 节点亚死亡状态的检测方法

观察 TelosB 节点的放电过程,发现在进入亚死亡状态之前,节点经历了电压平稳下降、电压快速下降和节点重启 3 个阶段。当节点在额定电压范围 (3.2~1.8V) 内工作时,电池内活性离子浓度较高,放电速度快,电压下降平稳,流出的正离子在阴极表面被消耗,被由阳极扩散而来的新的阳离子替代;当节点电压下降至 1.8V 时,为了维持节点各个功能模块的正常工作,电流相对恒定,随着电池容量的下降,电池中离子的扩散速度小于阴极的消耗速度,导致阴极的正离子浓度下降、阳极的正离子浓度增加,造成电池的输出电压快速下降;当电压下降至 1.6V 时,电池能量仅能维持节点内部功能模块的自身供电,当有事件发生时,因发送数据包造成节点微处理器 (Micro Controller Unit, MCU) 的供电电压不足而重启,重启时产生一个电压脉冲,可以瞬间提高节点的供电电压,此时节点进入不断重启的状态。

由于节点自身无法准确检测其电压值,本文以节点的 ADC 值作为参考。

当节点在额定电压范围下正常工作时,节点周期性地采集 ADC 值,并向邻居节点广播 Heartbeat 包。每个 Heartbeat 包包括 ADC 值、节点号和数据包序列号。邻居节点根据收到的 Heartbeat 包,判断该节点处于何种状态。如果 Heartbeat 包中 ADC 值较低且序列号归零,则说明该节点处于重启阶段。为避免无线丢包造成的影响,本文邻居监测方法^[7]检测节点是否处于沉默期。当检测到 Heartbeat 包中 ADC 值低于某个值 (1.6V) 时,节点进入亚死亡状态。向邻居节点广播的 Heartbeat 包中包括节点号和数据包序列号。被监测节点的工作过程可用伪代码描述如下:

```
extern BOOL IsEmpty();
BEGIN to monitor itself (Node M) // 被监测节点 M 开始自身监测
while (!IsEmpty()) { // 判断节点能量是否耗尽
    while (ADC > Min_ADC) {
        BOOL ADC = GET_ADC(); // 采集自身 ADC 值
        SN++;
        SendHeartbeat(ADC, SN, NodeID); // 向邻居节点广播 Heartbeat 包
    }
}
```

```
SN++;
SendHeartbeat(NULL, SN, NodeID);
}
END
```

监测节点 (即邻居节点) 收到 Heartbeat 包后,首先检测其 ADC 值。当发现被监测节点电压低于指定值时,根据 Heartbeat 包的序列号判断被监测节点是否处于重启期。为避免无线丢包造成的对重启期与沉默期的误判,当监测节点在设定时间 HTO1 内没有收到被监测节点的 Heartbeat 包时,本文采取随机延迟一段时间 (避免冲突) 后再广播查询包的方法,来确认被监测节点是否已进入沉默期。在设定时间 HTO2 内如果没有收到回复包,则认为被监测节点已经进入亚死亡状态,并广播检测结果。针对不同的网络状况,本文采用文献[4]中的方法选取 HTO1 与 HTO2 的经验值,以确认节点已经进入沉默期。且为避免误判,约定经验值的总长度不能超过沉默期的时长。监测节点的工作过程可用伪代码描述如下:

```
BEGIN to monitor neighbor node M // 开始对邻居节点 M 的监测
While (TimerFired()) {
    ReceiveHBFromM(); // 接收邻居的 heartbeat 消息
    if (ADC(m) < min_ADC) {
        According to serial number, obtain the number of node's reboot
        if (NumOfReboot > 1) {
            if (LossNum >= HTO1) {
                Sleep(RandomTime); // 随机延迟
                SendQueryPacket(); // 发送广播包
                break;
            }
        }
    }
    if (GetQueryPacket()) { // 是否收到查询包
        if (GetMsgFromM()) {
            SendAffirmPacket(); // 发送确认消息,确认 M 未处于沉默期
        }
    }
    if (WaitTime > HTO2 && GetAffirmPacket() == FALSE) { // 是否收到确认包
        SendResult(m); // 广播节点 M 死亡
    }
}
END
```

2.3 节点死亡状态的判断

节点处于亚死亡状态时,每一个节点周期 T_{ndei} 内,节点消耗的总电量应等于恢复的总电量,节点能量消耗满足以下关系:

$$f_i' \times T_n = f(T_{wi} \times R_{DC}) - f_i'[T_{wi} \times (1 - R_{DC})] \quad (2)$$

由式(2)可得

$$\frac{T_{wi}}{T_n} = \frac{1}{f/f_i' \times R_{DC} - 1 + R_{DC}} \quad (3)$$

在应用于事件检测的无线传感器网络中,当无事件发生时,节点的工作占比非常小。由式(3)可知,当 f_i' 一定时,节点工作能力 T_{wi}/T_n 较大,此时节点工作虽然受限,但仍然

具有较强的工作能力;当 R_{DC} 恒定, T_{wi}/T_n 的大小取决于 f_i' , f_i' 越大,则节点工作能力越强。

由定义 2 与式(3)可知,当 f_i' 满足以下关系时,节点从亚死亡状态进入了死亡状态:

$$\frac{f \times R_{DC}}{1 + 1/P_{min} - R_{DC}} \geq f_i' \quad (4)$$

3 实验及结果分析

在 TelosB 节点上采用多个品牌的电池进行了放电实验。本文列出选用松下电池的实验结果,对节点检测电压和实测电压进行对比,观察节点处于亚死亡状态时数据包的发送情况,分析工作能力 T_{wi}/T_n 的变化趋势。

3.1 实验参数

实验参数的设置如表 1 所列。

表 1 实验参数	
实验参数	值
Heartbeat 发送周期	1 sec
无线发包载荷	6 byte 或 8 byte
ADC 检测周期	1 sec
实际电压记录周期	500 ms

实验中,Heartbeat 包的格式如图 2 所示。节点周期性地发送 Heartbeat 包到 PC 机,PC 机记录了节点 AD 转换后的电压值和序列号,同时定期记录示波器检测到的节点实际供电电压。当节点进入亚死亡状态后,Heartbeat 包中的 ADC 值无效。

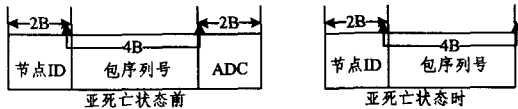


图 2 Heartbeat 包格式

3.2 实验结果分析

节点进入亚死亡状态之前,检测电压与实测电压随时间变化的规律如图 3 所示。从图中可知,当节点供电电压较低时,由 ADC 值计算得到的检测电压与实测电压存在较大偏差,这是由于节点自身电路的原因,检测电压不能及时反映实际电压的变化。因此,虽然节点重启阶段和沉默期的电压有明显的分界点,但节点无法直接通过自身检测得到的 ADC 值来判断是否处于亚死亡状态,应采用本文 3.2 节中提出的方法,以 ADC 值作为参考,通过监测节点的特殊现象判定其是否进入了亚死亡状态。

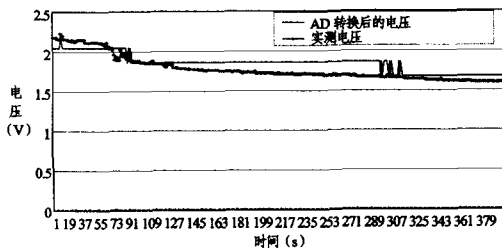


图 3 节点的检测电压与实测电压对比图

节点处于亚死亡状态时,工作能力随时间变化的曲线如图 4 所示。从图中可知,当节点进入亚死亡状态时,每一个节点周期内工作能力逐渐减弱。这是由于随着储电量的减少,电池回复能力越来越弱, f_i' 逐渐减小。可见,式(3)能够较准

确地反映亚死亡状态时节点工作能力的变化趋势。

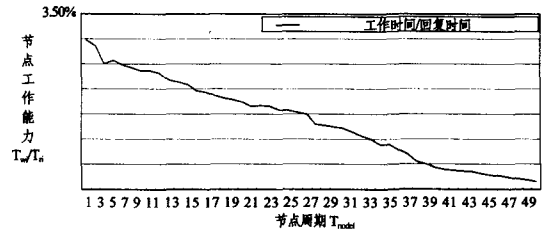


图 4 节点亚死亡状态时工作能力随时间变化的曲线

节点处于亚死亡状态时,工作情况如图 5 所示。从图中可以看出,节点每经历一段时间的电压回复后能够持续工作一定时间,随着回电周期的加长,节点平均能量回复速度 f_i' 越来越小。使用 Heartbeat 机制进行死亡节点检测时,合理的 HTO 值需要考虑通信丢包与回电周期对检测带来的影响。当 f_i' 变小时,用于判断节点死亡的 HTO 值应大于回电周期。而传统的死亡节点检测方法,并没有考虑节点回电速度的变化对 HTO 值设置带来的影响。当节点处于亚死亡状态时,使用传统的检测方法易造成误判,因此本文 3.3 节中对节点亚死亡状态时期的工作特点,提出将 f_i' 作为判断节点是否死亡的主要依据(如式(4)所示),以避免传统检测方法带来的误判。

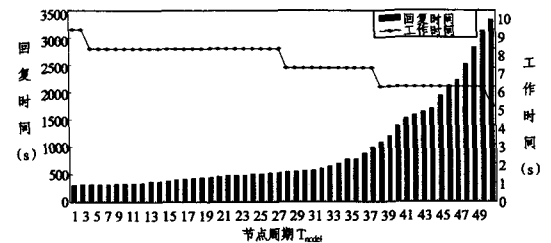


图 5 节点亚死亡状态时的工作情况

结束语 节点在事件检测的无线传感器网络应用中,通常采用碱性干电池供电,电池容量决定了节点的使用寿命^[7]。由于电池的回电特性和传感器节点的硬件特点,若采用 Heartbeat 机制检测节点的死活状态,很难得到合理的 HTO 经验值。本文针对应用于事件检测的无线传感器网络的特点,在大量实验的基础上,分析了节点因能量消耗而死亡的全过程,并根据节点工作受限的程度,定义了亚死亡状态与死亡状态,提出一种基于 Heartbeat 机制的节点亚死亡状态检测方法。本方法采用邻居监测方法检测节点是否处于沉默期,并参考节点自测电压值与重启现象判断其是否进入了亚死亡状态。实验表明,该方法有效地降低了误判,为事件检测无线传感器网络的实际应用提供了支持。

在未来的工作中,将进一步研究如何获取节点亚死亡状态下各个节点周期的平均能量回复速度,如何将死亡状态判断公式嵌入到节点程序中,以得到一种应用于事件检测无线传感器网络的死亡节点信息收集机制。

参考文献

- [1] Chandra T D, Toueg S. Unreliable Failure Detectors for Reliable Distributed Systems[J]. Journal of the ACM, 1996, 43(2): 255-267

(下转第 73 页)

算法和准确信道条件下的 BER 性能相差分别只有 0.000161, 0.035 和 0.0155。随着 SNR 的升高, 无论采用哪种调制方式, 本文算法 BER 性能都会和准确信道条件下 BER 性能越来越接近, 这是由于在较高 SNR 条件下, 得到的输出序列自相关系数估计以及预测滤波器系数都更精确。

在另一个仿真实验中, 对本文算法和传统 LPA 时域信道估计方法进行了比较。用 CFR 的均方根误差 (RMSE) 作为衡量估计效果的依据, 即

$$RMSE = \frac{1}{N_m} \sum_{p=1}^{N_m} \frac{||\hat{H}^p - H||}{||H||} \quad (20)$$

其中, N_m 为 Monte Carlo 实验次数, $\hat{H}^p$ 表示第 p 次实验的估计结果。从图 2 可以看出, 本文提出的算法估计性能要优于传统 LPA 时域信道估计方法。与第 3 节理论分析一致, 在低 SNR 条件下, 因为求得的新息以及新息和输出序列的互相关的误差会比较大, 所以这种优势更加明显。而随着 SNR 的增加, 二者的性能越来越接近, 超过 20dB 后, 性能基本趋于一致。

最后, 实验还考察了信道阶次过估计条件下算法的误差性能。调制方式为 8PSK。如图 3 所示, 当信道阶次取 4 和 5 时, 其估计性能与取实际信道阶次 3 时非常接近, 尤其当 $SNR \geq 16dB$ 时, 估计误差基本相等。这表明本文提出的算法对信道阶次过估计并不敏感。因此可以认为, 在实际应用中, 本文提出的算法并不需要确切知道信道阶次, 只需要知道信道阶次的下界。

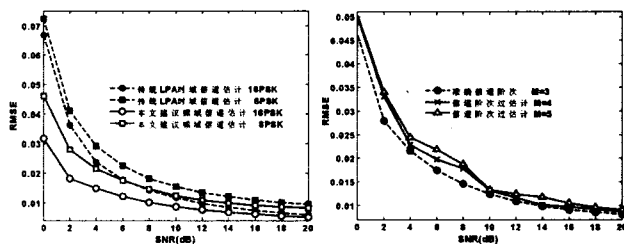


图 2 与传统 LPA 时域信道盲估计的 RMSE 对比

结束语 精确的 CFR 估计是保证 SIMO SC-FDE 通信系统性能的关键因素。本文提出的基于线性预测的 CFR 盲估计算法仅采用输出信号的二阶统计量, 直接从线性预测滤波器系数获得系统 CFR 估计值的闭式解, 避免了计算预测误差以及预测误差和输出序列的互相关, 比 LPA 时域信道估计具有更高的估计精度, 尤其在较低 SNR 时这种优势更加明显, 而且算法对信道阶次过估计不敏感。仿真结果表明本文

提出的算法具有很好的估计效果。

参考文献

- [1] Wang Z, Ma X L, Giannakis. OFDM or Single-Carrier Block Transmission [J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(3): 380-394
- [2] P802.16a. Draft Amendment to IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems-Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2-11G[S]
- [3] Yang Y, Chew Y H, Tjhung T T. Frequency-domain channel frequency response estimation for space-time coded MIMO systems [C]// IEEE International Conference on Communications, Istanbul, Turkey, 2006: 3123-3128
- [4] Kwon H J, Baek J S, Seo J S. Weighted Block Adaptive Channel Estimation for STBC SC-FDE over Frequency-Selective Fading Channels [J]. IEEE Electronics Letters, 2007, 43(15): 840-841
- [5] 杨波, 冯久超. 一种噪声和畸变混沌信号的滤波策略-I: 盲信道均衡 [J]. 计算机科学, 2006, 33(9): 61-65
- [6] Cai B, Zhao M J, Qiu P L. A Novel Subspace-Based Blind Channel Estimation for Cyclic Prefixed Single-Carrier Transmissions [C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Las Vegas, USA, 2006: 1537-1542
- [7] Slock D. Blind Fractionally-Spaced Equalization, Perfect-Reconstruction Filter Banks and Multichannel Linear Prediction [C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Adelaide, Australia, 1994: 585-588
- [8] Karim A - M, Eric M, Philippe L. Prediction Error Method for Second-Order Blind Identification [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(3): 694-705
- [9] Ghaleb I, Alim O A, Seddik K. A new finite alphabet based blind channel estimation for OFDM systems [C]// IEEE 5th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, Lisbon, Portugal, 2004: 102-105
- [10] Cao X R, Liu R W. General Approach to Blind Source Separation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(3): 562-571
- [11] Roy S, Li C Y. A Subspace Blind Channel Estimation Method for OFDM Systems Without Cyclic Prefix [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(1): 141-150
- [12] Tugnait J K, Luo W L. Linear Prediction Error Method for Blind Identification of Periodically Time-Varying Channels [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(12): 3070-3082

(上接第 42 页)

- [2] Rost S, Balakrishnan H. Memento: A Health Monitoring System for Wireless Sensor Networks [C]// 2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Adhoc Communications and Networks, Reston VA, USA, 2006: 575-584
- [3] Ramanathan N, Chang K, Kohler E, et al. Sympathy for the sensor network debugger [C]// Networked sensor systems: Third ACM Conference on Embedded Networked Sensor System (SenSys), San Diego, California, USA, 2005: 255-267
- [4] Hsin C F, Liu M. A Distributed Monitoring Mechanism for Wireless Sensor Networks [C]// Proceeding of the 3rd ACM Workshop on Wireless Security, Atlanta, GA, USA, 2002: 57-66

- [5] Bapat S, Leal W, Kwon T, et al. Chowkidar: A Health Monitor for Wireless Sensor Network Testbeds [R]. OSU-CISRC-10/06-TR76. The Ohio State University, 2006
- [6] Eai W, Bapat S, Kwon T, et al. Stabilizing Health Monitoring for Wireless Sensor Networks [C]// Lecture Notes in Computer Science, 8th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems, Dallas, TX, USA, 2006: 395-410
- [7] 王珏明, 顾超, 钱莉. 无线传感网之能量篇 [J]. 计算机应用与软件, 2007, 24(1): 85-86, 103
- [8] Koushanfar F, Potkonjak M, Sangiovanni V. On-line Fault Detection of Sensor Measurements [C]// Sensors, 2003. Proceedings of IEEE, Toronto, Canada, 2003, 2: 974-979