

基于工业无线网络的协作时间同步协议

许 娜^{1,3} 胡国林² 张晓彤³ 宋红玲³

(北京控制工程研究所 北京 100190)¹ (北京航天飞行控制中心 北京 100094)²

(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)³

摘 要 基于空间平均而非传统时间平均的思想,协作同步技术为无线传感器网络的时间同步提供了一种新的解决方案。结合工业无线网络的特点,利用无线传感器网络的广播特性,提出了一种源于空间平均思想的协作时间同步协议。该协议根据网络的实时状况,调整处理时间同步信息在空间和时间上的比例,以期达到高精度、高可靠性的目标。仿真实验表明,该协议比单一采用时间平均思想的时间同步协议具有更优异的性能。

关键词 无线传感器网络,时间同步,协作,空间平均

中图法分类号 TP393

文献标识码 A

Cooperative Time Synchronization Based on Industrial Wireless Networks

XU Na^{1,3} HU Guo-lin² ZHANG Xiao-tong³ SONG Hong-ling³

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)¹ (Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China)²

(School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)³

Abstract According to spatial average, not traditional time average, cooperative time synchronization supposes a new method for time synchronization in wireless sensor networks. In this work, we presented a cooperative time synchronization protocol that uses broadcasting and spatial averaging for the characters of industrial wireless networks. This protocol can adjust the rate of the time synchronization messages between time and space, in order to achieve high precision and strong robust. Simulation estimates that the protocol has much better synchronization performance than traditional protocol only using time average.

Keywords Wireless sensor networks, Time synchronization, Cooperation, Spatial average

时间同步技术是无线传感器网络的一项基础支撑技术。准确的时间同步是实现传感器网络自身协议的运行、数据融合、分时调度、协同睡眠、定位等的基础^[1-4]。近年来,随着无线传感器网络各项技术的进步,具有现代意义的工业无线传感器网络也取得了较大发展。新兴的面向设备间信息交互的无线通信技术,适合在恶劣的工业现场环境中使用,具有很强的抗干扰能力,其引发的工厂测控模式的变革,使传统认为成本过高、无法大规模部署传感器进行监测的应用成为可能^[5,6]。中国工业无线联盟(WIA, Wireless Networks for Industrial Automation union)自主研发的用于工业过程自动化的无线网络规范 WIA-PA(WIA System Architecture and Communication Specification for Process Automation)已于 2008 年 10 月正式成为 IEC(Electro-technical Commission)的 3 个国际标准草案之一^[7]。与其并列的是美国 ISA(International Society of Automation)学会制订的 SP100 标准草案^[8],以及 HART(Highway Addressable Remote Transducer)通信基金会发布的 HART7^[9]。本文的研究对象就是符合 WIA-

PA 规范的工业无线传感器网络。

1 传统的时间同步技术

传统有线网络经常采用客户端与服务器模式(C/S)。时间服务器周期性地向客户端发送时间同步消息,其中包含服务器的当前时间。如果服务器到客户端的典型延迟相对期望精度是非常小的,则只需要一次时间同步就能实现客户端与服务器之间的时间同步。采用这种设计思想的网络时间协议 NTP(Network Time Protocol)^[4]已被 Internet 用作网络时间同步协议。由于 Internet 与无线传感器网络的巨大差异, NTP 所依赖的条件在传感器网络中难以满足^[10]。近年来,不断提出新的针对无线传感器网络的时间同步协议。比较著名的有延迟测量同步协议(DMTS, Delay Measurement Time Synchronization)^[11]、TPSN(Time Synchronization Protocol for Sensor Networks)协议^[12]、泛洪时间同步协议(FTSP, Flooding Time synchronization Protocol)^[13]和参考广播协议(RBS, Reference Broadcast Synchronization)^[14]等。

到稿日期:2009-10-12 返修日期:2010-01-06 本文受 863 国家重点基金项目(2007AA041201 和 2007AA04Z169),国家自然科学基金(50674010)资助。

许 娜(1981—),女,博士,主要研究方向为无线传感器网络时间同步、计算机系统结构等,E-mail: xunause@sohu.com;胡国林(1982—),男,硕士,工程师,主要研究方向为航天测控等;张晓彤(1967—),男,博士,教授,主要研究方向为传感器网络、计算机系统结构、网络与通信等;宋红玲(1983—),女,硕士,主要研究方向为无线传感器网络路由协议等。

DMTS 协议考虑了报文传输过程中的延迟,将本地时间设置为报文传输延迟与发送时刻之和。如图 1 所示,发送节点检测到信道空闲,给同步广播报文加上时间戳 t_0 ,用来去除发送端的处理延迟和 MAC 层的访问延迟。在发送同步报文前,发送节点需要发送前导码和起始字符,以使接收节点进行接收同步,根据发送的比特个数 n 和发送每比特需要的时间 t ,估计出发送前导码和起始字符的时间 nt 。接收节点在时间同步报文到达时刻标记 t_1 ,在调整本地时钟之前时刻标记 t_2 ,则接收处理延迟为 $(t_2 - t_1)$ 。若忽略无线信号的传播延迟,接收节点为了与发送节点时间同步,将调整其本地时钟为 $t_0 + nt + (t_2 - t_1)$ 。

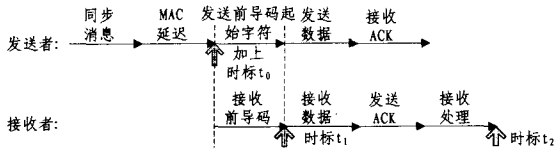


图 1 DMTS 同步报文的传输过程

TPSN 协议是典型的发送者-接收者同步协议,如图 2 的左图所示。发送者在报文中嵌入发送时刻而接收者记录下报文接收的时刻,利用这些时刻信息来估算收发双方的时间偏移,从而达到收发双方的时间同步。FTSP 协议就属于发送者-接收者协议,发送者在发送一个报文时连续标记了多个时间戳。接收者可以根据这多个时间戳,估计出中断等待时间,并结合静态设定的编解码时间对接收时间进行补偿,从而得到更精确的同步点。

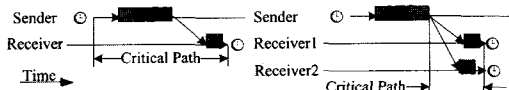


图 2 发送者-接收者同步和接收者-接收者同步的对比

发送者-接收者之间的同步很直观,然而报文的传输延迟往往不易估计。若传输路径过长,同步的精度将难以保证。J. Elson 等提出了接收者-接收者同步机制。RBS 时间同步机制通过接收节点对时抵消发送时间和访问时间,其基本过程如图 2 的右图所示。发送节点若广播一个信标报文,广播域中的两个节点都能接收到这个报文,并分别记录接收的时刻。这两个时刻的差值就是两接收节点的时间差值。其中一个节点可根据这个差值调整本地时钟,从而达到两个节点的时间同步。可以看出,相对于发送者-接收者同步机制,接收者-接收者同步机制的关键路径缩短了。

基于双向报文交换的协议同步精度较高,但一次只能同步一对节点,功耗较大。HRTS(Hierarchy Referencing Time Synchronization Protocol)^[15]协议利用无线通信的广播特性,只需要一次同步过程就可以完成一个单跳网内所有节点间的同步。这种方法降低了功耗,但同步精度也随之相对变差。

2 协作同步技术

2.1 多跳网络时间同步面临的挑战

随着无线传感器技术的发展,网络规模不断扩大,传统的时间同步协议被扩展到多跳网络中。目前普遍采取的方法是按照节点之间的通信连接关系建立起一定的网络拓扑结构;然后,在该拓扑结构上,按照时间同步协议的约定,未同步节点和所选定的已同步节点之间通过交换包含时间信息的同步

报文,从而间接地实现与时间基准节点之间的同步。此法的特点在于:除时间基准节点的邻居节点外,其余节点并不能直接和时间基准节点同步。由于传统时间同步协议在体系结构上的限制,节点不能直接和时间基准节点同步而只能和与时间基准节点存在同步误差的节点进行同步^[16],因此必将出现节点的同步误差随着其距离时间基准节点跳距(hop distance)的增加而增加的现象,即出现同步误差的累积。

理论分析及实验表明,在这些传统的时间同步协议下,即使在最好的情况下,节点的同步误差至少与其跳距的平方根成正比^[17]。随着无线传感器网络的发展,同步误差累积问题将越来越严重。一方面由于传感器节点体积的不断减小^[18],使得节点的单跳传播距离减小;另一方面由于网络规模的不断扩大,使得网络直径不断增加。这两个因素均会导致平均节点跳距的增加,使得同步误差的累积现象更加严重。这对应用大规模无线传感器网络提出了挑战。

2.2 协作同步的基本原理

文献[19]提出了协作同步。目前的假设条件为传播延迟固定并且节点密度非常高,节点的时间模型为速率恒定模型。虽然假设条件与实际还有一定差距,但这是解决大规模无线传感器网络时间同步问题的一个有益思路。在一个包括 n 个节点、分布不规则的网络中,时间基准节点位于网络的中心位置。如图 3 所示,按照如下步骤实现全网络时间同步。首先,节点 1 发送一个脉冲,之后这个脉冲将每隔 $s_1(t)$ 时间段被周期性地发送。在初始的 m 个脉冲发送之后,在节点 1 一跳范围内的节点(其中之一可称为 R_2)都将在同一时刻发送第 $m+1$ 次的脉冲(不包括节点 1)。节点 R_2 利用最新接收到的 m 个脉冲,分析得出发送第 $m+2$ 个脉冲的时刻,并继续这种发送行为。能够接收到从 R_2 和节点 1 发出的脉冲的节点,比如 R_3 ,在收到 m 个确定的脉冲后,也将开始它自己的脉冲发送时刻的分析。这种传播将不断进行,直到网络中所有的节点都接收到信号。文献[19]指出,只有在节点密度非常高的情况下协作同步才是可能的。

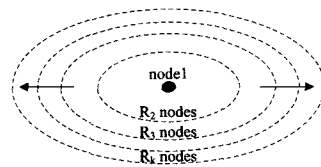


图 3 协作同步的过程

由上面的同步过程可以看出^[20],对于传统的时间同步协议来说,时间基准节点的时间信息必须通过中间节点的转发才能到达远方节点,该过程是同步误差累积的根本原因。而对于协作同步来说,远方节点直接接收到时间基准节点的同步脉冲,其他中间节点只是起协作的作用,协作时间基准节点把时间信息直接传输给远方节点,即使由于协作过程而引入了同步误差,但从统计的角度来看,节点的同步误差均值仍为 0,即不会出现同步误差的累积现象。

3 协作时间同步算法的描述与实现

3.1 网络模型

WIA-PA 规范定义了 5 类物理设备^[7]:主控计算机、网关设备、路由设备、现场设备和手持设备。如图 4 所示,工业无线网络采用星型和网状相结合的两层拓扑结构。第一层是网

状结构,由网关和路由设备构成;第二层是星型结构,由路由设备和现场设备或手持设备构成。一种类型的物理设备可以担任多个逻辑角色:网关设备可以担任网关、冗余网关、网络管理者、安全管理者的角色(一个网关设备不能同时担任网关与冗余网关的角色);路由设备可以担任簇首(cluster head)和冗余簇首的角色(一个路由设备不能同时担任簇首与冗余簇首的角色);现场设备和手持设备只能担任簇成员的角色。

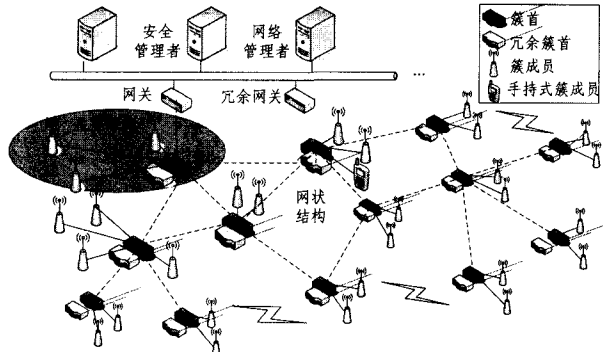


图4 网络拓扑结构

为了保证 TDMA 通信方式的可靠性,网络中的设备要进行时间同步。WIA-PA 网络内的设备仅与网关进行相对时间同步,以确保可以区分事件发生的先后次序。WIA-PA 的时间同步分为两层:在网状网络中,网关为时间源,各个路由设备与网关进行时间同步;在星型网络中,每个路由设备为时间源,所有现场设备与之完成时间同步。

传统的时间同步协议在节点的缓冲区内缓冲来自单个节点的、不同时刻的时间数据,通过处理这些时间数据来进一步提高时间同步的精度,这个过程可称为“时间平均”。相对于时间平均,若节点缓冲来自多个节点的、同一时刻的时间数据,并依靠这个数据的处理结果来进一步提高时间同步的精度,这个过程可称为“空间平均”^[21]。空间平均不再要求节点密度无穷大,也不再要求时间脉冲为时间沿跳变这类易于检测过零点的波形。

3.2 算法描述

类似多跳 TPSN 协议,建立全网同步是从建立生成树开始的^[12]。首先,从根节点发出一个 level_discovery 分组(分组中带有根节点的层变量 0)。根节点的所有单跳邻近节点为它们自己分配的层等于 1 加上 level_discovery 分组中的层变量,并接受根节点作为它们的父节点。然后第 1 层的节点发出它们自己的 level_discovery 分组,依次类推。同一层的每个节点选择一个随机延迟来避免过多的 MAC 碰撞。一旦某个节点接收到第一个 level_discovery 分组,该分组的发出者就被接受作为父节点,而后的 level_discovery 分组则被丢掉。由于 MAC 碰撞或者在生成树建立以后某个节点才加入到网络中,因此有的节点可能无法接收到 level_discovery 分组。如果节点 i 在一定的时间内没有接收到任何 level_discovery 分组,那么它就会向它的单跳邻近节点发出一个 level_request 分组,询问关于现在生成树的情况。节点 i 收集在某个时间范围内的应答,然后在它的邻近节点中选择一个层变量最小的节点作为它的父节点。图 5 是一个建立全网层次结构的简单过程。

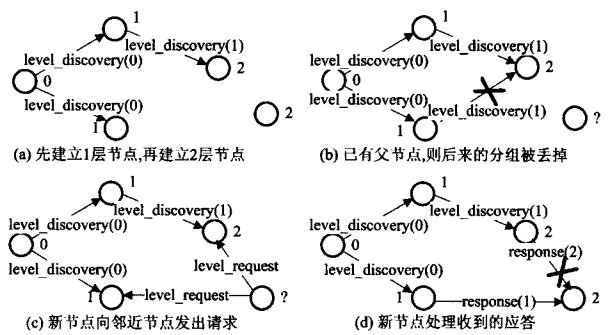


图5 全网层次结构的建立过程

节点 1 周期性地发送时间同步报文序列。每个时间报文序列包含 6 个时间同步报文,其中时间同步报文序列的发送周期是 3000s,同一序列中的 6 个报文的发送间隔是 10s。在节点 1 广播范围内的节点接收到节点 1 发来的某个时间同步报文序列中的所有报文后,根据接收到的时间戳信息,运用线性拟合算法校正本地时钟,并记录该序列中第一个报文的接收时刻。然后,向节点 1 发送时间同步接收响应报文。响应报文中含有接收方的节点信息,包括接收方的 ID、所在层次和时间调整量。节点 1 可以根据这些信息调整自己发送时间同步报文序列的周期。节点 1 将时间调整量的平均值与应用要求的时间同步精度进行比较。若时间调整量的平均值远远小于要求的时间同步精度,可认为网络整体时间同步性能较好,节点 1 将适当延长时间同步的间隔;反之,节点 1 不会改变时间同步的间隔,甚至为满足应用对时间同步精度的要求而缩短时间同步的间隔。如图 6 所示,接收到节点 1 发送的时间同步报文序列的节点(称为第 2 层节点),将组织自己的时间同步报文广播。为避免碰撞,其发送时刻由节点 1 指定。第 2 层节点发送时间同步报文序列的周期与节点 1 相同,每个时间报文序列中 6 个时间同步报文的发送间隔也与节点 1 相同。

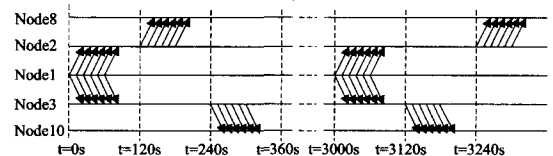


图6 同步报文的传播

一般来说,大型工业设备检测自动化网络具有下述特点^[5]:

- 1) 被检测设备位置相对固定,传感器节点一般不移动;
- 2) 传感器节点根据具体需要布局,分布不均匀;
- 3) 某些检测位置环境恶劣,为传感器节点更换电源很不方便;
- 4) 常规检测数据量不大;
- 5) 对不同部位检测数据的采集时间不同,要求的时间精度也不同。

采用协作时间同步协议能够提高网络的时间同步精度。例如处于第 i 层的某个节点 j 能够同时接收到来自 $i-1$ 层的节点 p 和节点 q 发来的时间同步报文序列。如果节点 j 在缓冲区内同时缓冲来自节点 p 和节点 q 的不同时刻的时间数据,并依靠对这些数据的处理来进一步提高自己的时间精度,则这就是一个空间平均的过程。有研究表明,空间平均的同步误差的反差和节点密度呈反比^[21]。节点密度越高,同步误

差也会越小。因此,协作时间同步协议非常适合节点密度较高的工业无线网络检测。此外,节点获得的时间同步的报文来源,也不再单一依赖于其父节点的发送,这样网络的可靠性也将得到提高。由于工业无线检测网络具有不同部位检测数据的采集时间不同、要求的时间精度也不不同的特点,协作时间同步协议可根据网络的实时状况,调整时间同步信息在空间和时间上的比例,动态维护对时间同步报文的处理量。

3.3 算法实现

协作时间同步协议的核心算法属于集中式算法,用在符合 WIA-PA 标准的工业无线网络的簇头节点。节点开始收集数据时,以广播方式向所有节点发出一个发现报文,通知这些节点加入网络。发现报文不断被传播,直至全网络的生成树被建立起来。生成树建立后,各节点处于等待时间同步报文的状态。分析收到时间同步报文的节点,其处理流程如图 7 所示。节点内部主要分为接收处理模块和发送处理模块。接收处理模块需要记录接收到的时间同步信息,并采用线性拟合算法得到全局同步时间,校正本地时钟;发送处理模块需要确定节点自身发送的时间同步报文的发送起始时刻、时间同步报文序列的发送周期以及同一序列中各个报文的发送间隔时间。

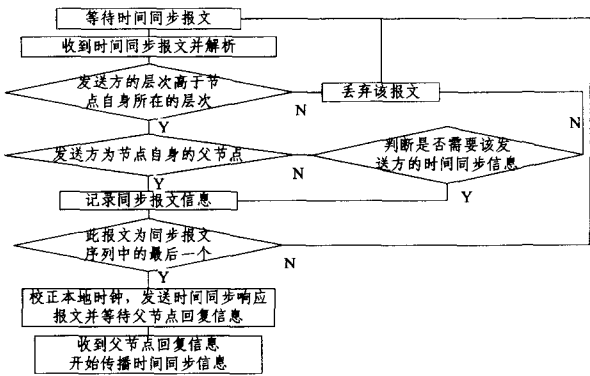


图 7 协作时间同步协议接收方处理流程图

协作时间同步协议可根据网络的实时状况,调整处理的时间同步信息在空间和时间上的比例。在满足应用要求的时间精度的条件下,动态选择对接收到的时间同步报文的处理情况。节点将线性拟合得到的时间调整量的平均值与应用要求的时间同步精度进行比较,若时间调整量的平均值远远小于要求的时间同步精度,节点认为网络的时间同步性能较好,将适当减少对接收到的并非来自父节点的时间同步报文的解析和处理;反之,节点将加大对时间同步报文的监听,甚至为满足精度要求而主动请求父节点缩短发送时间同步报文序列的周期。

4 仿真结果

OMNeT++是一款面向对象的离散事件网络仿真工具,可实现无线网络信道模拟、协议模拟、测定软件系统性能等多种复杂功能。OMNeT++模拟器可以根据不同的目的来改变用户接口、调试实例和批量执行。高级用户接口可以把模块透明地交给用户,即允许控制模拟器执行,以及通过改变模块中的变量/对象来干涉模拟器的执行。本文就是在 OMNeT++平台上进行仿真的。

为验证协议的有效性,我们在半径为 100m 的圆形区域

内布置 37 个节点。图 8 就是这 37 个节点的拓扑结构图。每个节点可与相邻的 6 个节点进行通信。节点 ID 为 1 的节点被布置在了网络的中心位置。

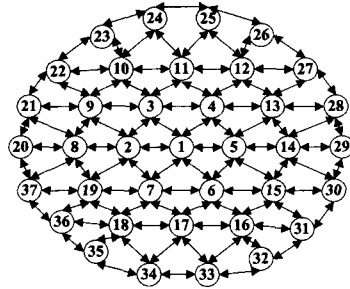


图 8 网络拓扑结构

图 9 是根据网络的拓扑结构采用层发现算法得到的全网络生成树。该生成树由 4 层组成,位于第 1 层的 ID 为 1 的节点是整个网络的时间同步基准节点。时间同步基准节点每隔 3000s 发出一个时间同步报文序列,每个序列中包含 6 个时间同步报文。接收到足够数量时间同步报文的节点,将取得和时间基准节点的同步,并继续传播时间同步报文。

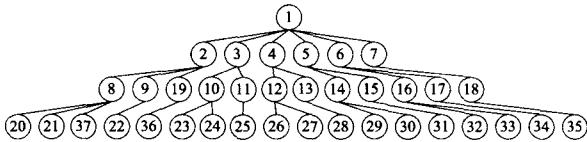


图 9 全网络生成树结构

图 10 是协作时间同步协议运行 24h 后各个节点收到的时间同步报文的统计数据。对比节点收到的时间同步报文的总数和其来自节点的父节点的报文数,可以发现采用协作同步协议后,节点能够接收到的时间同步报文数目明显增加,因而节点的时间同步精度也将得到提高。

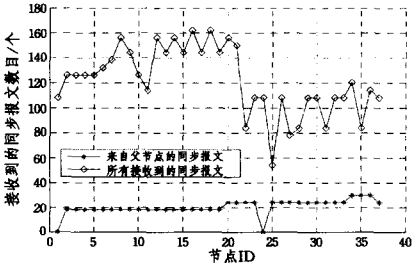


图 10 时间同步报文数目对比

结束语 本文吸收了协作同步的基本思想,用空间平均策略来代替单一的时间平均,提出了适合工业无线传感器网络的协作时间同步协议。该协议充分利用了无线传感器网络的广播特性,为无线传感器网络的时间同步问题提供了一种新的解决方案。该协议可根据网络的实时状况,调整处理时间同步信息在空间和时间上的比例,降低节点对网络生成树结构的依赖。实验表明,协议和传统的单一采用时间平均的时间同步协议相比,具有高精度、高可靠性的特点。

参考文献

[1] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcast[C]//Proc. of the Fifth Symp on Operating systems Design and Implementation (OSDI2002). New York: ACM Press, 2002: 147-163

这样一旦发生控制指针信号跳变,测试人员可以迅速对子故障进行定位排除,大大缩短了诊断时间;3)此外,在实例中,“输出随机故障、无输出、输出混乱”经与本文提出的故障诊断框架中所包含的故障信息数据库相匹配,判断其是否是重复发生的历史故障,再利用故障诊断框架中的故障诊断数据库,可以直接调用诊断数据库中的历史模型来诊断该故障,从而迅速定位并排除该故障。而传统的故障诊断方法^[1,3-6,10]则需要针对该历史故障重新建立贝叶斯网诊断模型,有可能造成测试时间与资源的浪费。

结束语 本文提出含有故障观察节点的四层 WCMF 贝叶斯网诊断模型,在此基础上提出基于故障信息数据库与故障诊断数据库的软件故障诊断框架。本文的研究成果具有如下的优点:首先,本文充分利用 SFMEA 的定性分析结果,可以快速建立有效的贝叶斯网结构;其次,给出了明确的诊断操作,即依据各原因节点的后验概率大小依次诊断,并依据诊断结果实时更新诊断模型;再次,模型中的故障观察节点可以为后续测试过程中及时地进行故障定位提供信息;最后,能够充分利用历史故障诊断信息,避免重复的故障诊断,在提高故障诊断效率的同时,降低故障诊断可能带来的时间和资源消耗。综上所述,本文提出的基于贝叶斯网与 FMEA 的诊断模型及框架,能够为复杂系统软件以及安全关键软件快速有效地进行故障诊断提供帮助。需要说明的是,本文所提出的故障诊断模型以及诊断框架尚未工具化,并且实例中各节点或(与)门关系也比较简单,这些将是未来的研究方向。

参考文献

- [1] 陈琳,黄杰,龚正虎.一种网络环境中的故障诊断模型[J].北京航空航天大学学报,2004,30(11):1092-1096
- [2] Lutz R R, Woodhouse R M. Experience Report; Contributions of SFMEA to Requirements Analysis[A]// Second International Conference on Requirements Engineering[C]. 1996:44-51
- [3] Lee G J, Poole L. Diagnosis of TCP overlay connection failures using Bayesian networks[A]// Workshops of SIGCOMM[C]. 2006:305-310
- [4] Ting Han, Bo Li, Limei Xu. A Universal Fault Diagnostic Expert System Based on Bayesian Network[A]// International Conference on Computer Science and Software Engineering[C]. 2008: 260-263
- [5] 谭琳,胡谷雨,等.基于贝叶斯网络的计算机网络端到端服务故障诊断[J].海军工程大学学报,2005,17(5):5-9
- [6] 何鑫,杨顺昆,刘斌.基于 FMEA/FTA 的嵌入式软件故障诊断模型与应用[J].计算机测量与控制,2009,17(1):42-45
- [7] 申光耀,张刚. SFMEA 技术综述与应用航天型号的探索[A]//中国宇航学会计算机应用专业委员会学术交流会论文集[C]. 2004
- [8] Lee Inhwan, Iyer R K. Diagnosis Rediscovered Software Problems Using Symptoms[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2000, 26(2): 113-127
- [9] 胡志刚,马好,廖麟.基于模糊神经 Petri 网的故障诊断模型[J].小型微型计算机系统,2005,26(11):1978-1982
- [10] 陈小岗,孙宇,张晓阳.基于 FMEA 的贝叶斯诊断网络构建方法研究[A]//第十二届全国设备检测与诊断学术会议[C]. 2005
- (上接第 71 页)
- [2] Ganerwal S, Kumer R, Srivastava M B. Timing-Sync Protocol for Sensor Networks[M]. New York: ACM Press, 2003: 138-149
- [3] Ganerwal S, Kumar R, Adlakha S, et al. Network - wide time synchronization in sensor networks [OL]. <http://www.ee.ucla.edu/ram>, 2002
- [4] Elson J, Romer K. Wireless sensor networks: A new regime for time synchronization[C]//The First Workshop on Hot Topics in Networks(HotNets-I). New Jersey, USA, 2002
- [5] Wan Y, Li L, He J, et al. Anshan: Wireless Sensor Networks for Equipment Fault Diagnosis in the Process Industry[A]// Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2008. SECON '08. 5th[C]. San Francisco, CA, June 2008: 314-322
- [6] Edgar H C. Wireless Sensor Networks: Architecture and Protocol[M]. New York: Auerbach Publications, 2004: 21-110
- [7] Industrial communication networks-Fieldbus specifications-WIA-PA communication network and communication pro[EB/OL]. <http://www.iec.ch/65C/518/RVD>
- [8] <http://www.isa.org/>
- [9] 彭瑜.无线 HART 协议——一种真正意义上的工业无线短程网协议的概述和比较[J].仪器仪表标准化与计量,2007(05). http://www.hartcomm2.org/hart_protocol/wireless_hart/wireless_hart_main.html
- [10] Romer K, Blum P, Meier L. Time synchronization and calibration in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the Ivan Stojmenovic, Handbook of Sensor Networks: Algorithms and Architectures. 2005:199-237
- [11] Su Ping. Delay measurement time synchronization for wireless sensor networks[J]. IEEE Micro, 2002, 122(6): 12-24
- [12] Ganerwal S, Kumar R, Srivastava M. Timing-sync protocol for sensor networks[C]//Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Los Angeles, 2003: 138-149
- [13] Maroti M, Kusy B, Simon G, et al. Flooding time synchronization in wireless sensor networks[C]//ACM SenSys'04. Baltimore, Maryland, November 2004
- [14] Elson J, Gried L, Esrein D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[C]//Proc. 5th Symp Operation Systems Design and Implementation (OSDI 2002). Boston, MA, December 2002
- [15] Dai H, Han R. TSync: a lightweight bidirectional time synchronization services for wireless sensor networks[J]. ACM Mobile Computing and Communication Review, 2004, 8(1): 125-139
- [16] Xu Chaonong, Zhao Lei, Xu Yongjun, et al. Broadcast time synchronization algorithm for wireless sensor networks[C]//The 1st Conf on Sensing, Computing and Automation (ICSCA'06). Chongqing, 2006
- [17] 徐朝农,赵磊,徐勇军,等.无线传感器网络时间同步协议的改进策略[J].计算机学报,2007,30(4):514-523
- [18] Charles S P. Mathematical aspects of heart physiology[OL]. <http://www.math.nyu.edu/faculty/peskin/heartnotes/index.html>, 1975
- [19] Hu A, Servetto S D. On the scalability of cooperative time synchronization in pulse-connected networks[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(6): 2725-2748
- [20] 徐朝农,徐勇军,李晓维.无线传感器网络时间同步新技术[J].计算机研究与发展,2008,45(1):138-145
- [21] Hu A, Servetto S D. A scalable protocol for cooperative time synchronization using spatial averaging[C]//the IEEE/ACM Transactions on Networking. October 2006