

事件检测型传感器网络的可靠性维护

胡四泉¹ 杨金阳¹ 王俊峰²

(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)¹ (四川大学计算机学院 成都 610065)²

摘要 传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)的事件检测型应用中,如何通过可靠性维护来保证在检测到事件时报警信息能及时、可靠地传输到监控主机至关重要。通过对不可靠的无线链路和网络传输的分析,提出多路冗余可靠性维护算法 MPRRM。通过解析方法和仿真分析证明,该算法在可靠性、误报率、延迟和消息开销量上比同类算法具有优势。

关键词 无线传感器网络,可靠性,失效检测

中图分类号 TP301 **文献标识码** A

Reliable Maintenance of Wireless Sensor Networks for Event-detection Applications

HU Si-quan¹ YANG Jin-yang¹ WANG Jun-feng²

(School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)¹

(College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China)²

Abstract The reliability maintenance of the wireless sensor network is a key point to keep the alarm messages delivered reliably to the monitor center on time in an event-detection application. Based on the unreliable links in the wireless sensor network and the network characteristics of an event detection application, MPRRM, a multiple path redundant reliability maintenance algorithm was proposed in this paper. Both analytical and simulation results show that the MPRRM algorithm is superior to the previous published solutions in the metrics of reliability, false positive rate, latency and message overhead.

Keywords Wireless sensor networks, Reliability, Failure detection

1 前言

无线网络、传感器和微机电系统等技术的飞速发展,推动了具有现代意义的无线传感器网络(WSN)的产生和发展^[1]。WSN涉及众多学科,成为目前信息技术领域的研究热点,相继被一些重要机构预测为将改变世界的重要新技术。如今科学界正在部署大量的实验网络用于生态环境监测,工业界正在逐步利用WSN监控生产设备和实现智能家居环境。可以预见,WSN将广泛应用于对自然环境、生产环境和家居环境等的监控。

然而,监控WSN本身的健康状态依然是未解决的难题^[2]。由于节点失效、无线链路的不可靠、节点的睡眠调度以及网络拓扑变化的不可预测性,要获取WSN完全的健康状态信息变得非常困难。但是网络健康状态监控又是WSN应用中不可缺少的功能性要求,因而近来WSN的网络管理和健康监控成为WSN领域的研究热点^[3-6]。

WSN按照应用分类为数据采集型和事件检测型。数据采集型WSN周期性地采集数据,基站通过分析数据来判断节点的状态。事件检测型WSN中无周期性数据,只是在事件发生时才报告给基站^[7-9]。长期以来,事件检测型WSN的

应用面临挑战:一方面,应用者希望网络在事件未被检测到(如温度正常时意味着无火险)时不要传输数据,以节约功耗;另一方面,事件被检测到时(如温度过高意味着发生火灾)又希望能够将事件消息可靠、及时地传输到监控中心。这两种需求是矛盾的。由于无线链路不可靠或者节点失效,导致事件被检测到时数据传输路径可能不可用或者需要较长延迟重新寻找路由。如何采用尽量小的开销,为事件检测型无线传感器网络提供可控性维护,是事件检测型无线传感器网络中的重要课题。

WSN的管理方案可以分为主动侦听管理模式^[10-12]和被动侦听管理模式^[13,14]。主动侦听管理模式是利用WSN本身的节点收集传输管理数据,占用网络本身的资源;被动侦听管理模式则不使用工作网络本身的资源,而是在WSN网络之外建立一套平行的监听网络,用于收集工作网络的数据。SNIF工具^[13]和Pimoto工具^[14]都采用了被动监听管理模式。SNIF在所部署的工作网络之外建立一个专用的支持网络,支持网络中的节点偷听(overhear)工作网络中传输的数据,分析工作网络中的问题。类似地,Pimoto在工作网络中放置额外的监听节点,收集工作网络中的数据包,并传输到监控中心进行分析,主要用于部署前的WSN协议开发。

收稿日期:2010-02-09 返修日期:2010-04-21 本文受国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2008AA01Z208, 2008AA022503, 2009AA01Z405),国家自然科学基金资助项目(60772150),四川省青年基金项目(2009-28-419)资助。

胡四泉(1973—),男,博士,讲师,主要研究方向为无线传感器网络、分布式系统, E-mail: husiquan@ustb.edu.cn。

被动监听管理模式的优点是干扰原工作网络以及不受原工作网络中的不可靠通信的影响,适合于 WSN 开发。但是,建立一套平行的监控网络对于实际部署大规模 WSN 来说需要增加过多的节点而增加硬件投资,所以在实际的 WSN 管理中,被动监听管理模式是不可行的。学术界更多探讨的是主动侦听管理模式,如 SNMS^[10], L-SNMS^[15], Sympathy 的直接心跳法(DirectoryHeartbeat, DH)^[11]和 Memento 的分布式聚合法(Distributed Aggregation, DA)^[12]。

但是,SNMS 和 L-SNMS 都需要用户干预,而其中的节点失效或者链路失效是不可预测的,所以不适用于事件检测型传感器。DH 算法和 DA 算法的可靠性维护算法设计是针对数据收集型传感器网络的,虽然可以用于事件检测型应用,但其在数据量、误报率、灵敏性上都不满足事件检测型应用的要求,存在改进的空间。

基于目前学术界还没有专门针对事件检测型应用提出可靠性维护算法的事实,本文提出多路冗余可靠性维护(MPRRM)算法,它能够减少用于可靠性维护的数据量,降低误报率。

2 多路冗余可靠性维护算法

MPRRM 算法的核心思想是通过控制节点密度(Over deployment),使得每个节点有至少两个父节点,这两个父节点都作为该节点的观察者(Observer),负责报告本节点的失效(failure)信息。基站节点看成虚拟的两个节点。

MPRRM

Step1 Initialization at node s ; s is not a Base Station, $f(s)$ is the main observer of s , $m(s)$ is the second observer of s , C is the collection of the nodes who are the children of s and take s as main observer; denote current time as $t0$, schedule the event for next detection interval at $t0+DT$, DT is the detection interval.

Step2

loop on receiving, call UponMessage(msg) if msg received;

When $t = t0 + \text{delta}$, new Report1, Report1. rpttype = 1, send Report1 to $f(s)$;

if no ACK from $f(s)$ {new Report2, Report2. rpttype = 2, send Report2 to $m(s)$ };

When $t = t0 + 0.5 * DT$, check all children $y \in C$,

if y . ReportFlag == false {new Report(y . failure = true); route Report to Base Station;}

When $t = t0 + \text{detectioninterval}$,

at s , update $t0 = t$; schedule next interval event $t0 + DT$;

goto Step2

at base station, if (only received one report s . failure = true) s . failure = true; else s . failure = false; goto Step2

Function UponMessage(msg) {

if (msg. rpttype == 1 && $s == f(\text{msg. sender})$)

{msg. sender. ReportFlag = True;

end ACK to msg. sender;}

else if (msg. rpttype == 2 && $s == m(\text{msg. sender})$)

{new Report(msg. sender. failure = false); route Report to

Base Station;}

else forward(msg);}

图1 MPRRM 的伪代码

在 MPRRM 中,一个网络节点的两个父节点都可以为本节点转发消息,其中一个为主观察者,另一个为副观察者。如图 1 所示,在每一个检测周期中,网络节点给主观察者发送“存活”报告,主观察者若收到“存活”报告,将给该节点发回确认消息,该检测周期结束。若没有收到“存活”报告,则向基站报告该子节点失效。一个节点如果在给主观察者发送“存活”报告后没有收到确认消息,则向副观察者发送“存活”报告。副观察者在接收到“存活”报告后会给基站发送消息,表明该子节点有效,以修复可能被主观察者误报的消息。

在 MPRRM 中,某节点如果失效,那么在一个检测周期中,其将被主节点发现并通过基站报告给监控中心。而节点未失效时,主观察者如果收到存活报告,就可以判断该子节点有效,无需通过较长的路由经过中间节点逐跳到基站来报告节点的有效性,相对于 Sympathy 和 Memento 减少了消息量,从而降低了功耗。如果由于链路不可靠导致主观察者未收到报告,可以由副观察者进行修正,这减少了节点被误报为失效的概率。

3 MPRRM 分析

本部分将从误报率、消息量、延迟方面分析 MPRRM 的性能,并与 Sympathy 的直接心跳法(DH)和 Memento 的分布式聚合法(DA)进行比较。首先,为了公平起见,假设 3 种算法采用相同的检测周期, DH/DA 算法需要发送数据的次数假设为 r ;其次,选取同一网络中某一深度为 d 的网络节点;第三,假设每跳消息成功接收概率为 p_i ,失败概率为 $p_i = 1 - p_i$ 。

3.1 误报率分析

由于链路不可靠,使得正常工作的节点被误判为失效。网络中误报的节点个数与正常节点个数的比值即为误报率(false positive rate)。

在 DH/DA 算法中,对深度为 d 的节点 A ,其误报率为 $(1 - p_i^d)^r$ 。在 MPRRM 中,深度为 d 的节点 A 的误报率为 $p_i p_n^{(d-1)} (1 - p_i p_n^{(d-1)})$,其中 $p_n = 1 - p_i^2$ 为冗余拓扑中消息成功递送到下一跳的概率; $p_i p_n^{(d-1)}$ 是主观察者未收到“存活”报告而向基站节点报告节点 A 失效的消息成功到达基站的概率;而 $(1 - p_i p_n^{(d-1)})$ 是副观察者未能将失效误报修复消息送达基站的概率。

令 $r=3$,得到不同算法下深度为 5 的某节点被误报失效的概率,如图 2 所示, X 轴为数据传输成功率(Packet Success Rate, PSR),反映不同的无线通信质量。在 PSR 较低时,MPRRM 比 DH, DA 表现出更少的误报率。

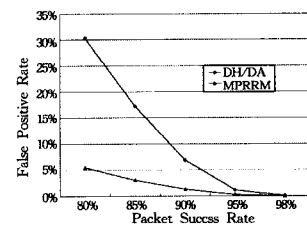


图2 DH, DA 和 MPRRM 的误报率

3.2 消息量分析

用于节点失效检测的算法消耗的消息量的多少决定了功耗的大小。在事件检测型 WSN 中,消息量直接反映了可靠

性维护算法的能量消耗。

在一个检测周期中,DH 在一个周期中节点 A 消耗的消息总量为 rd 。DA 因为使用了数据聚合的优化方法,在一个周期中节点 A 消耗的消息总量为 r 。在 MPRRM 中,消息量的期望值为 $1+p_1(2(d-1))+1+p_2(d-1)$ 。其中 1 为节点 A 向主观察者发送的报告, $p_1(2(d-1))$ 为主观察者未收到报告而给基站汇报节点 A 失效所产生的消息量上限, $p_1(1+p_2(d-1))$ 是 A 向副观察者发送存活报告以及副观察者向基站发送修复信息的信息总量上限。

图 3 给出了 3 种算法中某深度为 5 的节点每检测周期用于可靠性维护所消耗的消息量。在不同的 PSR 下,DA 和 MPRRM 消耗的消息量比 DH 少,而 DA 和 MPRRM 消耗的消息量类似。在 PSR 较小即通信质量不好的情况下,DA 的消息量比 MPRRM 略少。但由图 2 知道,这是以此时 DA 误报率高为代价的。在 PSR 大于 90%,即通信质量较好的情况下,MPRRM 的消息量略少于 DA 算法。

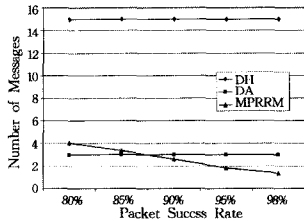


图 3 DH,DA 和 MPRRM 在深度为 5 的节点上的消息量

3.3 延迟分析

假设节点 A 某时刻 T_0 失效,而基站判断出节点 A 失效的时刻为 T_1 ,那么 $T_1 - T_0$ 即为节点失效检测算法的延迟。在相同的检测周期条件下,3 种算法的延迟是一致的(忽略路由延迟),但 DA 和 DH 是以牺牲消息量为代价的。在相同的误报率要求和相同的心跳间隔(即 DH 和 DA 中的 $r=1$)下,3 者的延迟是有差异的。如假设 3 种算法检测周期都为 5min,每跳数据递送率为 95%,为了使误报率不高于 0.3%,3 者的延迟如表 1 所列。

表 1 检测周期为 5min,在相同误报率和相同心跳间隔条件下 DH,DA,MPRRM 的节点失效检测延迟

算法	MPRRM	DH	DA
延迟(分钟)	5	20	20

4 仿真

为了实际检验 MPRRM 的性能,我们在无线传感器网络仿真系统 Castalia^[16]中实现了 MPRRM。为了与 DH 算法和 DA 算法进行比较,同时实现了 DH 和 DA 算法。

Castalia 仿真的事件检测型无线传感器由 50 个 TelosB^[17]节点组成,按照网格部署在长 300m、宽 300m 的区域中并形成冗余拓扑,最大深度为 5。为公平比较各算法的优劣,所有算法都采用 5min 的检测周期。DH/DA 算法中每个节点在每个检测周期报告 3 次,而 MPRRM 中每个节点每周只报告 1 次。

图 4 给出了仿真中在不同通信质量下 3 种算法的误报率的比较。在不同的通信质量条件下,DH 算法和 DA 算法的误报率是类似的,而 MPRRM 的误报率明显低于 DH 算法和 DA 算法。特别是在网络通信质量不好的情况下,这种优势

更加明显。如在 PSR=80%时,DH/DA 算法的误报率达到 30%,而 MPRRM 的误报率则比 DH/DA 算法的误报率减少了 80%。这得益于 MPRRM 采用了多路冗余机制,使得主观察者的误报能够被副观察者修复。仿真结果表明,MPRRM 具有较低的误报率和较少的消息开销。

图 5 给出了不同通信质量下 3 种算法消耗的消息量。DH 算法的消息量明显高于 DA 算法和 MPRRM,而 MPRRM 的消息量约为 DA 算法的 2/3。因此,MPRRM 是三者中消息量最少的。又因为事件检测型 WSN 中的消息量直接反映了可靠性维护算法的能量消耗,因而 MPRRM 也是 3 种算法中能效最高的。这是因为 MPRRM 采用冗余结构,不需要在每个周期中多次报告“存活”消息。

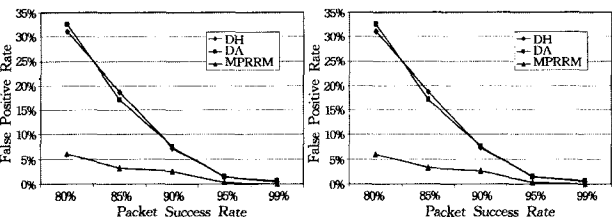


图 4 仿真中 DH,DA 和 MPRRM 的误报率 图 5 仿真中 DH,DA 和 MPRRM 在一个检测周期中的消息量

结束语 事件检测型传感器网络中,监控网络本身的健康状况非常重要。传统的健康状况监控算法由于消息量大、误报率低,不适合于事件检测型无线传感器网络。本文提出多路冗余可靠性维护算法,它采用冗余观察者结构,能显著减少消息量,降低误报率,比其他同类算法更优越。

参考文献

[1] Yick J,Mukherjee B,Ghosal D. Wireless sensor network survey [J]. Computer Networks,2008,52:2292-2330

[2] Zia H A,Sridhar N,Sastry S. Failure detectors for wireless sensor-actuator systems[J]. Ad Hoc Netw,2009,7(5):1001-1013

[3] Koushanfar F, Potkonjak M, Sangiovanni-Vincentelli A. Fault Tolerance in Wireless Ad-hoc Sensor Networks[C]// Proceedings of IEEE Sensors, 2002

[4] Paradis L, Han Q. A Survey of Fault Management in Wireless Sensor Networks[J]. J. Netw. Syst. Manage,2007,15(2):171-190

[5] Luo X, Dong M, Huang Y. On distributed fault-tolerant detection in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Computers,2006,55(1):58-70

[6] Gruenwald C, Hustvedt A, Beach A, et al. SWARMS: A Sensor-net Wide Area Remote Management System[C]// IEEE/Create-Net 3rd International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities(TridentCom). 2007:1-10

[7] Doolin D, Sitar N. Wireless sensors for wildfire monitoring[C]// Proceedings of SPIE Symposium on Smart Structures and Materials, 2005

[8] Martincic F, Schwiebert L. Distributed Event Detection in Sensor Networks[C]// International Conference on Systems and Networks Communications, 2006:43-43

[9] Dziengel N, Wittenburg G, Schiller J. Towards Distributed Event Detection in Wireless Sensor Networks[C]// DCOSS'08. Santorini, Greece, 2008

- [10] Tolle G, Culler D. Design of an Application-cooperative Management System for Wireless Sensor Networks[C]//Second European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN). Istanbul, Turkey, 2005
- [11] Ramanathan N, Chang K, Kapur R, et al. Sympathy for the sensor network debugger[C]//Proc. 3rd ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2005). New York, NY, USA, 2005
- [12] Rost S, Balakrishnan H. Memento: A health monitoring system for wireless sensor networks[C]//Proc. 3rd IEEE Communications Society Conf. Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (IEEE SECON 2006). IEEE, Piscataway, NJ, 2006
- [13] Ringwald M, Romer K. Deployment of Sensor Networks: Problems and Passive Inspection[C]//Fifth Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems. 2007: 179-192
- [14] Dressler F, Nebel R, Awad A. Distributed Passive Monitoring in Sensor Networks[C]//Proceedings of 26th IEEE Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM 2007). Demo Session, Anchorage, Alaska, USA, 2007
- [15] Yuan F, Song W, Peterson N, et al. Lightweight Sensor Network Management System Design[C]//Sixth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. 2008: 288-293
- [16] Ngoc H P, Peditakis D, Boulis A. From Simulation to Real Deployments in WSN and Back[C]//The 1st IEEE International Workshop from Theory to Practice in Wireless Sensor Networks. Helsinki, Finland, 2007
- [17] Polastre J, Szewczyk R, Culler D. Telos: enabling ultra-low power wireless research[C]//Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. 2005: 364-369

(上接第 68 页)

式中, $E_{T\text{-}elec}$ 和 $E_{R\text{-}elec}$ 表示无线发送和接收模块的能耗; ϵ_{fs} 和 ϵ_{amp} 分别表示自由空间模型和多路衰减模型的放大器能耗参数; d_0 是常数。其它的仿真参数详见表 1。

表 1 仿真参数表

参数	值	参数	值
网络尺寸	400 * 400m ²	$E_{R\text{-}elec}$	50nJ/b
节点数	2000	E_{min}	0.02J
R_s	25m	数据包报头	25B
$E_{T\text{-}elec}$	50nJ/b	初始能量	60J
ϵ_{fs}	10(pJ/b)/m ²	广播包大小	25B
ϵ_{amp}	100pJ/b/m ²	每轮时间	100ms

5.1 不同网络覆盖度下活跃节点数量对比

本实验研究在不同网络覆盖度情况下网络中活跃节点的实验数量,如图 6 所示。随着网络覆盖度的提高,网络中活跃节点的数量明显增加。通过与 CCP 协议对比,可以看到使用 RTS 算法的网络中处于活跃状态的节点数量明显比使用 CCP 协议的网络活跃节点的数量要少。在保证网络 3 度覆盖情况下,两种算法下活跃节点数量相差不大。但随着网络覆盖度的提高,两者的活跃节点数量差距增大,这说明了 RTCA 算法在保证网络覆盖度要求的条件下能更有效地提高计算网络覆盖度的准确性,从而调度更少的传感器节点处于活跃状态。

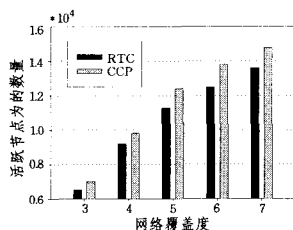


图 6 不同网络覆盖度时网络中活跃节点数量对比

5.2 网络生存时间对比

图 7 反映的是在网络 3 度覆盖条件下网络中节点剩余能量随时间变化的对比情况。从图中可以看到,运行中的网络节点总的剩余能量随时间变化而在不断地减少。与 CCP 协议相比,RTCA 算法在保证网络覆盖度要求的同时消耗的能量更少。当网络运行相同长度的时间后,使用 RTCA 算法的网络能够比使用 CCP 协议的网络大约平均节省 20% 的能量,

这是因为 RTCA 算法在计算网络覆盖度时计算开销较小,对节点的能量消耗较少。

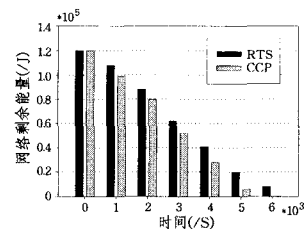


图 7 网络剩余能量随时间变化对比

结束语 本文以无线传感器网络的 k 度覆盖为出发点,提出了一种应用鲁洛三角形的分布式 k 度覆盖算法。算法根据传感器节点局部位置信息判断网络监测区域覆盖度大小,并根据网络节点的剩余能量和冗余情况调整传感器节点的状态,以提高节点的能量效率。仿真结果表明,本文算法在保证网络覆盖质量时能够有效地减少活跃节点的数量,延长网络的生存时间。本文算法做进一步的扩展后还可以用于判断异构无线传感器网络多重覆盖。

参考文献

- [1] Bai X, Yun Z, Xuan D, et al. Pattern Mutation in Wireless Sensor Deployment[C]//Proceedings of INFOCOM-10. 2010
- [2] 毛莺池, 梁奕, 周晓峰. 一种能量异构自适应的无线传感器网络覆盖控制协议[J]. 计算机科学, 2009, 36(5): 39-44
- [3] Xing G, Wang X, Zhang Y, et al. Integrated coverage and connectivity configuration for energy conservation in sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 2005, 1(1): 36-72
- [4] Xing X, Wang G, Wu J, et al. Square Region-based Coverage and Connectivity Probability Model in Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of CollaborateCom-09. Washington DC, USA, 2009: 1-8
- [5] Bai X, Xuan D, Yun Z, et al. Complete optimal deployment patterns for full-coverage and k-connectivity ($k \leq 6$) wireless sensor networks[C]//Proceedings of ACM MobiHoc-08. 2008: 401-410
- [6] Talluri R, Aggarwal J. Mobile Robot Self-Location Using Model-Image Feature Correspondence[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996(1): 63-77
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Reuleaux_triangle
- [8] Bollobas B. The Art of Mathematics; Coffee Time in Memphis [M]. Cambridge University Press, 2006
- [9] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>