

二元决策图和故障树相融合的 无线传感器网络可靠性分析

刘 春

(四川建筑职业技术学院网络管理中心, 四川 德阳 618000)

摘要: 为了提高无线传感器分析网络可靠性, 提出一种基于二元决策图和故障树相融合的无线传感器网络可靠分析方法; 首先根据无线传感器网络拓扑结构建立了故障树模型, 然后将无线传感器网络故障树转化为二元决策图结构, 最后采用仿真实验分析了不同节点冗余度、不同跳数条件下无线传感器网络的可靠性; 仿真结果表明, 文章方法的分析结果可以帮助无线传感器网络性能的优化, 可以提高无线传感器网络的可靠性。

关键词: 无线传感器网络; 可靠性分析; 故障树分析法; 二元决策图

Reliability Analysis of Wireless Sensor Networks Based on Binary Decision Diagrams and Fault Tree

Liu Chun

(Network Management Center, Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, China)

Abstract: In order to improve reliability of wireless sensor networks, a new reliability analysis method of wireless sensor networks is proposed based on binary decision diagrams and fault tree in this paper. Firstly, fault tree model is built based on hierarchical clustering topology of wireless sensor networks, and then network fault tree of topology structure is converted into binary decision diagrams structures, finally, the simulation experiment is carried out to test the performance under different performance criterion such as node redundancy, different hops between nodes. The results show that the proposed method can provide useful message for the performance optimization of wireless sensor network and improve the reliability of wireless sensor network.

Keywords: wireless sensor network; reliability analysis; fault tree analysis method; binary decision diagrams

0 引言

无线传感器网络 (wireless sensor network, WSN) 是由部署在监测区域内大量的微型传感器节点组成, 传感器节点能量受限, 节点能量使用完则失效, 同时自然界破坏会导致节点失效, 加上网络入侵的破坏性, 这些因素对传感器网络可靠性产生重要影响, 因经如何提高无线传感器网络可靠性一直无线网络研究领域的重点^[1]。

针对无线传感器网络可靠性问题, 国内学者和专家进行了大量的研究, 提出了许多有效的无线传感器网络可靠性分析方法^[2]。文献 [3] 根据网络拓扑结果对无线传感器网络可靠性进行建模与分析; 文献 [4] 提出了基于容斥原理法的无线传感器网络可靠性分析方法; 文献 [5] 从任务完成所需能量等约束条件下, 通过引入了能量权函数, 建立了无线传感器网络系统可靠性模型; 文献 [6] 将无线传感器网络系统可靠性与系统的功能联系起来, 考查连通性测度以外多种因素对可靠性的影响; 文献 [7] 采用连通性和覆盖性对基本簇单元进行可靠性研究, 但仅从抗毁性测度的角度来研究无线传感器网络系统的可靠性。故障树模型可以体现故障传播的层次性以及子与父节点间的因果关系, 而故障树分析法 (fault tree analysis, FTA) 是一种而下逐层展开的图形演绎分析法, 因此有学者

将其引入到无线传感器网络可靠性分析中, 如文献 [8] 提出一种动态故障树的无线传感器网络可靠性综合分析方法, 寻找故障树的全部最小割集分析网络的可靠性。二元决策图 (Binary Decision diagrams, BDD) 可以直观地反映出函数的逻辑结构, 能够简化故障树定性和定量分析过程, 其在计算机网络、电子电路的可靠分析中得到了广泛的应用, 为无线传感器的可靠性分析提供了供了一种新的研究工具^[9]。

为了提高无线传感器分析网络可靠性, 提出一种基于二元决策图和故障树相融合的无线传感器可靠分析方法 (FAT-BDD), 首先根据无线传感器网络拓扑结构建立了故障树模型, 然后将无线传感器网络故障树转化为二元决策图结构, 并通过理论和仿真实验分析该方法的有效性和优越性。

1 无线传感器网络可靠性的相关定义

1.1 无线传感器网络的假设

节点随机分布于无线传感器网络监控区域内, 首先节点不断对监控范围内的数据进行感知, 然后通过簇头节点把数据传送到 Sink 节点, 最后 Sink 节点通过因特网等进行外部网络的通信。结合 WSN 应用背景, 做如下假设:

- 1) 每一个节点具有唯一 ID, 位置固定, Sink 节点能量及计算能力不受限制。
- 2) 普通节点能量有限, 级别相同, 簇头的级别更高, 可以直接与 Sink 进行通信。
- 3) 节点结构相同, 具有接受和传递数据功能, 普通节点可以成为簇头节点^[10]。

收稿日期: 2014-09-01; 修回日期: 2014-10-23。

作者简介: 刘 春 (1981-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事计算机网络管理方向的研究。

1.2 可靠性相关定义

定义 1: 无线传感器节点的可靠度: X 表示无线传感器节点 v 的寿命, $F_v(t)$ 表示无线传感器节点的失效函数, 那么在时刻 t 无线传感器的生存概率计算公式为:

$$R_v(t) = P\{X > t\} = 1 - F_v(t) = \overline{F_v}(t) \quad (1)$$

式中, $R_v(t)$ 称为无线传感器节点在时刻 t 的可靠度。

定义 2: 可用路径 (an operational path, Op) 失效: 在无线传感器网络中, 可用路径是源节点和目标节点保持连通的路径, 如果路径上经过的任何一个传感器节点发生故障, 那么源节点和目标节点之间的通信就中断通, 就可以认为该条路径失效。

定义 3: 传感器节点失效: 当传感器节点 v_i 出现永久性故障, 那么该传感器节点和目标节点间不存在可用路径 (Op), 从而无法进行正常通信, 那么就表示该传感器节点失效。

定义 4: 无线传感器网络的可靠度: 无线传感器网络的可靠度记为 R_{WSN} , 是衡量网络可靠性的一个重要指标, 则无线传感器网络失效概率为:

$$P_{WSN} = 1 - R_{WSN} \quad (2)$$

式中, P_{WSN} 是指在特定的拓扑结构下, 根据失效条件发生导致网络整体失效的概率。

1.3 无线传感器节点的失效概率

设 WSN 的 4 种节点集合为: (sink, CH, Sensor), 其中 sink 表示汇聚节点, CH 表示簇头节点, Sensor 表示普通节点, 由于它们在网络中的位置和功能的不同, 节点失效率不同, 通过平均失效前时间 (Mean Time To Failure, MTTF) 来计算出节点失效率, 具体计算公式为:

$$MTTF = EX = \int_0^{\infty} t dF(t) = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

式中, λ 为节点设备的失效率。

1.4 无线传感器网络的可用路径失效概率

设 op_i 表示节点 v 到达目的节点的第 i 条可用路径, 若节点 v 到达目的节点有 n 条可用路径, 则这 n 条可用路径中至少有一条可用的概率为

$$R_{op-v} = P\left(\bigcup_{i=1}^n op_i\right) = P\{op_1 \cup op_2 \cdots \cup op_n\} =$$

$$\sum_{i=1}^n P\{op_i\} - \sum_{i < j} P\{op_i op_j\} + \cdots + (-1)^{n+1} P\{op_1 op_2 \cdots op_n\} \quad (4)$$

因此, 节点 v 的可用路径 op_v 全部失效的概率计算公为:

$$P_{op-v} = 1 - R_{op-v} \quad (5)$$

1.5 故障树分析法 (FTA)

故障树分析法主要用于分析复杂系统的可靠性, 是一种有效的可靠性定性分析工具。设一个由 n 个独立的底事件构成的故障树, 设 X_i 为底事件 i 的状态变量, X_i 仅取 0 或 1 两种状态, Φ 表示顶事件的状态变量, 且仅取 0 或 1 两种状态, 作如下定义:

$$X_i = \begin{cases} 1, & \text{该元件有故障} \\ 0, & \text{该元件正常} \end{cases} \quad (6)$$

式中, 状态 1 和 0 分别代表该事件发生和不发生, 状态 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 是故障树的结构函数, 是一个表达设

备状态的布尔函数。

1.6 二元决策图 (BDD)

二元决策图 (BDD) 是一种特殊的树型结构, 采用二叉树形式表示一个布尔逻辑函数, 是一个有向无圈图, 由终结点和非终结节点组成, 节点之间由“0”或“1”分支连接, 终结点有两个状态, 其“1”状态表示系统故障, “0”状态表示系统正常工作, 图 1 是一个故障树与其对应的 BDD。

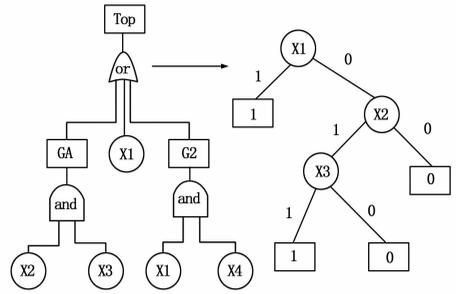


图 1 故障树转化成为 BDD

1.7 FTA-BDD 的 WSN 可靠性分析过程

基于 FAT-BDD 的无线传感器网络可靠性分析算法分为两个阶段, 具体如下:

- 1) 用递归方式实现无线传感器网络故障树向 BDD 的转化;
- 2) 遍历 BDD, 并计算无线传感器网络可靠度。

从图 2 可知, 一个故障树与其对应的 BDD 遍历路径有多条, 设顶事件的所有从根节点到叶子节点值为“1”, 采用深度优先搜索方式找到全部不交路径, 那么无线传感器网络系统失效的发生概率与全部不交路径之和相等, 递归公式如下:

$$P_{WSN} = P(F) = \begin{cases} 0, & F = 0 \\ 1, & F = 1 \\ P(F_{x=1}) + (1 - P)(F_{x=0}), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

无线传感器网络失效概率步骤具体如下:

- 1) 通过深度遍历故障树确定作为基本事件的节点序列。
- 2) 从根节点开始, 初始化故障树每个节点的索引号, 子节点个数, 操作逻辑, 和构建当前节点的孩子节点队列, 如果是叶子节点则标记其操作逻辑为 -1, 如果是非叶子节点则“OR”操作标记为 0, “AND”操作标记为 1, 构建无线传感器网络的故障树, 并返回故障树根节点地址。
- 3) 从故障树中获取节点索引号, 将故障树转换为 BDD 结构, 判断当前节点是否是叶子节点, 如果是, 则利构造叶子节点的 BDD 结构, 并将该叶子节点的索引号一起存入所构造的 BDD 中, 并返回 BDD, 否则继续下一步操作。
- 4) 如果当前节点索引号操作逻辑为“OR”门, 则跳转到步骤 3), 则继续访问该节点的子节点, 将返回值存入集合 set1, 并将 set1 中的 BDD 进行“or”连接否则继续下一步操作。
- 5) 如果当前节点操作逻辑为“AND”门, 则跳转到步骤 3), 则继续访问该节点的子节点, 将返回值存入集合 set2, 并将 set2 中的 BDD 进行“and”连接, 否则继续下一步操作。
- 6) 故障树的 BDD 的地址附给指针变量根节点, 为 BDD 中节点构造哈希表并初始化。
- 7) 计算节点失效率函数, 从根节点开始深度遍历访问节

点,若当前节点是叶子节点的左孩子,则返回 1;若是叶子节点的右孩子,则返回 0。

8) 根据当前节点的地址作为关键字在哈希表中查找,如果有记录,返回哈希表中当前节点的失效概率,否则继续下一步。

9) 计算当前节点两个分支上的失效概率,然后用当前节点的地址作为关键字,将失效率存入哈希表中,并返回该节点失效概率。

2 仿真实验

2.1 仿真环境

为了测试本文提出无线传感器网络可靠性分析方法的有效性,在 Intel P₄ 4 核 2.8 GHz CPU, 8G RMA, 800 G 硬盘, Windows 7 的操作系统进行仿真实验。设无线传感器网络划分 7 个簇,每个簇包括 4~13 个普通传感器节点,有 7 个簇头节点,节点通信半径为 10 m,簇内传感器节点之间采用单跳方式进行通信,而簇头节点和汇聚节点之间采用多跳与单跳的混合通信方式。无线传感器的网络结果如图 2 所示。

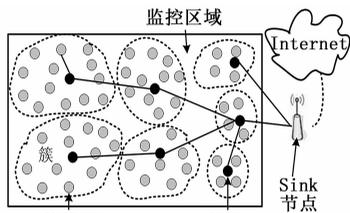


图 2 无线传感器网络结构

2.2 结果与分析

2.2.1 不同 MTTF 下的网络失效概率

不同平均失效前时间 (MTTF) 条件下,无线传感器网络的失效概率变化曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出,对于所有 MTTF 条件下,无线传感器网络失效概率均是呈现指数增长变化趋势,但是它们的斜率不相同,其中 MTTF=2 年的无线传感器网络的生存时间最短,当工作 5 000 小时左右时,传感器网络的失效概率≈1, MTTF=4 年的无线传感器网络生存时间相对延长,长达到 13 000 小时,而 MTTF=6 年的无线传感器网络生存时间最长,达到 2 000 小时,实验结果表明,传感器节点的 MTTF 越大,那么节点的失效概率越小,无线传感器网络的生存时间就越长,无线传感器网络的可靠性越高。

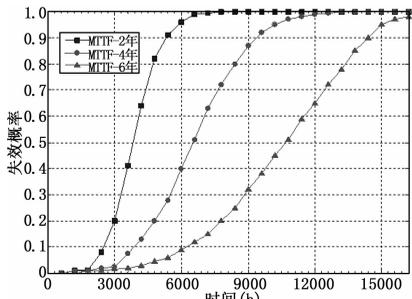


图 3 不同 MTTF 的网络失效概率变化曲线

2.2.2 不同跳数下的网络失效概率

在传感器节点失效率 $\lambda = \text{MTTF}^{-2}$ 年条件,节点间的跳数分别为 2~6 时的无线传感器网络失效情况变化曲线如图 4

所示。从图 4 可以清楚看出,随着通信节点间的跳数增多,无线传感器网络的失效概率就增大,无线传感器网络的生存时间相应就短,这主要是由于跳数越多,节点通信路径上经过的节点相对越多增加了路径上的失效概率,并增加了传感器能量和资源的消耗,无线传感器网络的系统开销也相对增加,通信成本比较高。

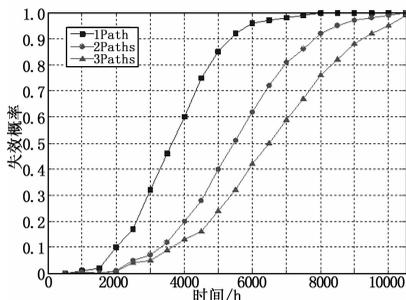


图 4 不同跳数下的网络失效概率变化曲线

2.2.3 不同路径数的网络失效概率

不同路径数的网络失效概率变化曲线如图 5 所示。从图 5 可知,点之间的通信可用路径越多网络的失效概率就越小,因此增加节点之间的路径数能够有效地降低网络的失效概率,因为路径越少,一旦链路受阻,就不会有其它的路径通往目的节点,而当前无线传感器网络一般采用分簇结构,可以提供多跳的冗余路径,从而无线传感器网络的容错性。如果一个路由节点失效或者是两个节点之间的链路不可以用,那么网络会自动重新配置失效组件的路径。

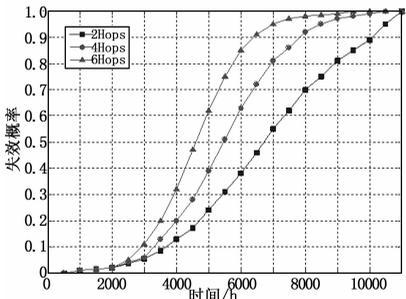


图 5 不同路径数的网络失效概率变化曲线

2.2.4 不同冗余节点下的网络失效概率

不同冗余节点条件下的网络失效概率如图 6 所示。从图 6 可知,网络工作 1 000 小时以前,分别给普通传感器节点、簇头节点、汇聚节点增设一个冗余设备,它们的无线传感器网络失效概率几乎没有多大差异,而在网络工作 1 000~2 500 小时范围内,为簇头节点增加冗余设备的无线传感器网络的失效概率相对较低。当网络工作大于 2 500 小时时,普通传感器节点、簇头节点、汇聚节点的失效情况差异比较明显,普通传感器节点失效概率比簇头节点、汇聚节点失效概率小得多因此通常情况,无线传感器网络通过增加普通传感器节点的冗余,可以有效降低网络的失效概率,但由于普通传感器节点数量增加,网络信代价也相应增加,但是比增加簇头节点、汇聚节点增加的代价要小,因此通常情况下考虑增加普通传感器节点,提高了网络的可靠性。

3 结束语

故障树分析是无线传感器网络可靠性分析的关键技术,如

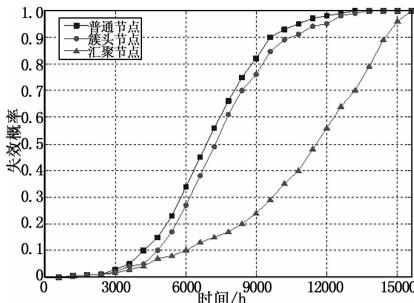


图 6 不同冗余节点的网络失效概率变化

何提高求解故障树最小割集的速度和准确性是无线传感器网络研究领域关注的焦点，为了对无线传感器网络的可靠性进行全面综合分析，提了一种二元决策图和故障树相融合的无线传感器网络可靠性分析方法。首先对无线传感器网络模型以及网络可靠性的相关定义进行分析，然后建立无线传感器网络的故障分析树模型，并先将故障树转化为二元决策图，并深度优先方式通过遍历二元决策图直接获取割集，从而得到无线传感器网络的可靠度，最后给出了特定环境下的无线传感器网络可靠性仿真实验。仿真结果表明，本文方法的分析结果有助于无线传感器网络的性能优化，提高无线传感器网络的可靠性，具有一定的实际应用价值。

参考文献:

[1] 邱丽娟, 姜 宇, 胡成全. 无线传感器网络可靠性研究进展[J].

(上接第 1601 页)

4 MAS 系统仿真实现

根据上述系统模型设计，利用基于 Java 的 Netbeans7.0 开发环境，搭建基于 JADE 平台的多 Agent 分布式远程监测系统体系结构，其创建各 Agent 类过程的关键代码 MainAgent.bat 如下：

```
Setclasspath=%classpath%;c:\jade\lib\jade.jar;c:\jade\lib\
iiop.jar;c:\jade\lib\http.jar;.\bin\classes
Java jade. Boot-Container
mainFrame.edu.hust.flying.jade.agent.MainAgent
Agent;edu.hust.flying.jade.agent. * * * Agent()//创建各功能 Agent
sd.addLanguages ( FIPANames.ContentLanguage.ACL );//使用 ACL 通信语言
Void CheckDate() extends Thread{}//查询数据库
```

系统模拟自群团指挥端通过通信控制机经无线电台通信，并以相同路径至下级（群营）指端这一指挥通信链路。在整体装备运行正常，通控机异常状态下，群营端不能正常接收上级指令，遂对其通信链路进行故障部位诊断作业仿真，结果显示设备故障状况结果，具有良好实效性。

5 结论

基于多 Agent 技术设计构建了远程智能监测与故障诊断系统，并将其运用于指控装备系统保障工作中具有一定指导性意义，对于指控装备分布式的特点能充分发挥 MAS 的自主交互性等优势，实验仿真也证明该系统有可靠诊断效果，具有良好

传感器与微系统, 2011, 30 (10): 1-8.
 [2] 朱晓娟, 陆 阳, 邱述威, 等. 无线传感器网络数据传输可靠性研究综述 [J]. 计算机科学, 2013, 40 (9): 1-8.
 [3] Bartlett L M, Andrews J D. An ordering heuristic to develop the binary decision diagram based on structural importance [J]. Reliability Eng and Syst-Safety, 2001, 72: 31-38.
 [4] Ahn J, Hong S, Heidemann J. An adaptive FEC code control algorithm for mobile wireless sensor networks [J]. Journal of Communications and Networks, 2005, 7 (4): 489-499.
 [5] Felemban E, Lee C U, Ekici E. MMSPEED; multi-path multi-speed protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 5 (6): 738-76.
 [6] 何 明, 权冀川, 郑 翔, 等. 基于二元决策图的网络可靠性评估何明 [J]. 控制与决策, 2011, 26 (1): 32-36.
 [7] Chi K, Jiang X, Horiguchi S. Network coding-based reliable multicast in wireless networks [J]. Computer Networks, 2010, 11 (4): 1823-1836.
 [8] 张书奎, 樊建席, 崔志明. 无线传感器网络中可靠的数据协作传输机制 [J]. 通信学报, 2010, 31 (11): 30-40.
 [9] Yu R, Zhang Y, Song Z Y, et al. Joint optimization of power, packet forwarding and reliability in MIMO wireless sensor networks [J]. Mobile Networks and Applications, 2011, 16 (6): 1-11.
 [10] Courtade T, Wesel R. Optimal allocation of redundancy between packet level erasure coding and physical-layer channel coding in fading channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59 (8): 1-9

可行性，能智能完成装备监测诊断等保障任务。下一步将贴近实际，不断加强诊断数据库建立，并对系统冲突融合性加以完善，使诊断结果更具准确性和时效性。

参考文献:

[1] 刘 伟, 贾希胜, 王广彦, 等. 多 Agent 仿真的装备维修保障效能评估系统设计与实现 [J]. 火力与指挥控制, 2013, 38 (1): 50-53.
 [2] 王 宏, 杨建军, 郭蓬松. 基于 Agent 的虚拟抢修任务系统的设计与实现 [J]. 计算机工程与设计, 2009, 30 (22): 5147-5150.
 [3] 李 鸣, 魏震生. 多 Agent 的智能故障诊断系统 [J]. 火力与指挥控制, 2007, 32 (7): 83-86.
 [4] 崔 勇. 基于多 Agent 结构的远程协同故障诊断系统研究与设计 [D]. 洛阳: 信息工程大学, 2008.
 [5] Smith R G. High-level Communication and Control in a Distributed Problem Solve. The Contract Net protocol [J]. Computers, IEEE Transactions, 1980, C-29 (12): 1104-1113.
 [6] 张 洁. 基于 Agent 的制造系统调度与控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
 [7] Huhns M N, Stephens L M. Multiagent System and Society of Agents [M]. The MIT Press, 1999.
 [8] FIPA. Specification Part2-Agent Communication Language The Text Refers to the Specification [Z]. 1999.
 [9] 刘建辉, 张俊利, 王 爽. 基于 Agent 的远程协同故障诊断系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 19 (1): 23-27.