

无线传感器网络中节点失效的可靠性研究

徐雪鑫, 梁家荣, 宋小天

(广西大学 计算机与电子信息学院, 广西 南宁 530004)

摘 要: 针对目前无线传感器网络可靠性计算复杂, 资源消耗大的问题, 提出一种可靠性计算的快速算法. 和直接用容斥原理计算相比, 该算法包含更少的项和算术运算, 通过不交和运算生成一些新网络来计算各个节点到 sink 节点的可靠性或者得到可靠性的表达式. 所得到的中间网络结构简单, 可靠性容易计算. 最后通过算例演示和算法复杂度分析说明了算法的可行性.

关键词: 无线传感器网络; 分簇; 节点失效; 可靠性; 可靠性表达式

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)06-0095-05

Reliability Research of Wireless Sensor Networks with Node Failures

XU Xue-xin, LIANG Jia-rong, SONG Xiao-tian

(College of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: A new algorithm was proposed to solve two problems, complex reliability-calculating and large energy-consuming. Contrasted to the inclusion-exclusion principle, the algorithm generates fewer items and fewer arithmetic operations in solving the same problem. Numbers of new sub-nets generated during the process of disjoint and calculation. The sub-nets were used to calculate the reliability between the sink node and other nodes or to build the expression for calculating reliability. The structures of the new networks are simple and the reliability is easy to calculate. Finally, an example and complexity analysis demonstrate the feasibility of the algorithm.

Key words: WSN; clustering; node failures; reliability; the expression of reliability

1 引言

随着无线通信、电子与传感技术的发展, 无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)引起了人们的广泛关注^[1]. 由于单个传感器节点结构简单、能量有限, 常因环境干扰、能量耗尽等原因而失效, 对网络监测信息的准确性、完整性和时效性造成直接影响, 甚至导致网络崩溃不能继续满足应用需求. 近几年, 一些对节点失效问题进行研究的文献相继出现, 这说明了传感器网络感应器失效问题已经得到越来越多的关注. 为了减少失效节点对其邻居节点产生的干扰, 中国科学院的高建良等人提出了基于加权中值的分布式故障检测算法^[2]. 在 Tulone

等人的工作中, 节点根据环境数据的分布模型采用一种渐进式的估计算法, 通过估计值与采样值的偏离度判断节点是否失效^[3]. 已有的技术表明, 网络内的感应器失效节点是可以被检测出来的, 但是如何计算存在失效节点的网络可靠性并估计网络运行的稳定性及传输数据的准确性和完整性是一个亟待解决的问题.

目前关于 WSNs 可靠性分析已有一些初步成果, 如: 文献[4]提出基于事件到 sink 节点的传感器网络可靠性, 并给出了一种可靠的传输协议 ESRT; 文献[5]针对无线传感器网络协议中可靠性及能量有效性, 提出能量感知的无线传感器网络可靠路由 EARRP. 文献[6]考虑节点不可靠情况下, 使用分解

收稿日期: 2010-09-20; **修回日期:** 2010-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(61064002); 国家教育部新世纪人才支持计划(NCEF-06-0756); 广西研究生教育创新计划资助项目(2008105930812M52)

算法求解一般网络的可靠性. 然而, 这些方法运算量都很大, 计算过程会使网络的能量大大消耗, 只适合中小规模的网络. 而 WSNs 的规模通常是比较庞大的, 过于复杂的计算方法显然会在一定程度上降低网络的性能. 传感器网络部署环境特殊, 单个节点结构简单、能量有限, 以致传感器节点常因环境干扰、能量耗尽等原因而失效, 对网络监测信息的准确性、完整性和时效性造成直接影响. 因此, 研究运算量子网络能量消耗不大的 WSNs 可靠性算法显得很有实际意义.

2 问题提出及定义

2.1 问题的提出

按照网络中节点运行功能的不同, 将传感器网络中的节点分为三类^[7]: (1) sink 节点, 是无线传感器网络与外界联系的桥梁, 负责收集其他节点传来的数据信息; (2) 中转节点, 主要负责数据的多跳转发, 也可以采集数据; (3) 采集节点, 只负责采集数据并将自身采集的数据转发给下一跳的中转节点或者 sink 节点.

在分簇 WSNs 中, 假设各个簇分别由 $C_1, C_2, \dots, C_n$ 表示, 其中 n 为簇的个数, 则簇 C_i 的可靠性可描述为^[7]: 簇 C_i 中至少有一个节点到汇聚节点(sink 节点)有路的概率. 其中“有路”是指簇中一个节点的数据经过一跳或者多跳能够到达 sink 节点. 假设任两个簇不相交且簇与簇之间的节点不进行数据交换, 整个网络以及链路(节点与边)的工作状态是独立统计的. 因此, 整个网络的传输可靠性定义为所有簇的可靠性之积, 即:

$$R(G) = \prod_{i=1}^n R(C_i) \quad (1)$$

式中, C_i 表示第 i 个子簇.

可见, 整个网络的传输可靠性问题可归结为求每个子簇的可靠性问题. 需要研究在一个具有中转节点的簇状采集网络中, 设已知各个节点的正常工作概率, 求整个网络的传输可靠性.

2.2 定义

定义 1 (最简路)^[8]: 在传感器网络 G 中, 若 T 是从源节点 s 到目的节点 t 的一条路, 且路上所有节点集合没有子集可以形成 s 到 t 的路, 称为 T 最简路.

为了后续叙述方便, 介绍如下术语和记号:

(1) $G(V, E)$, 由传感器网络的路由拓扑形成的路由网络. 其中传感器节点集合为 $V, V = \{v_1, v_2,$

$\dots, v_n\}$; 节点之间的边集合为 $E, E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$. 以下将 $G(V, E)$ 称为传感器网络, 简记为 G .

(2) $R(G)$, 传感器网络 G 的可靠性.

(3) $pa(s, t)$: 表示图 G 中从节点 s 到节点 t 的一条路径, pa_k 表示从源节点到目的节点的第 k 条路径.

(4) $s pa(s, t)$: 表示图 G 中从源节点 s 到目的节点 t 的一条最简路. $s pa_k(s, t)$ 表示图 G 中从源节点 s 到目的节点 t 的第 k 条最简路.

(5) 不交和公式: 系统可靠性分析的一种形式, 它代表系统成功的逻辑多项式. 由于各个项都是不相交的, 所以系统的可靠性就是这些项的概率之和.

(6) G_i : 求解 SPRT 过程中生成的中间网络.

定义 2 (最简路有序根树 SPRT)^[8]: 树的根点是源点 s , 叶点为目的节点 t , 中间节点为 G 的其他节点, 树上每条根点 s 到叶点 t 的路恰对应一条 $s pa(s, t)$ 路, 包含所有的 $s pa(s, t)$ 路, 且任意两条路的分开点为根节点(源点 s)开始的连续相同节点的最后一个节点.

定理 1 对于某一指定的拓扑网络, 网络中每一个节点到 sink 节点有唯一的 SPRT 和它对应.

证明: 若 SPRT 不唯一, 则忽略树中各个子树的左右排序, 则至少有两棵不一样的 SPRT, 这两棵 SPRT 之间至少存在一条 $s pa(s, t)$ 不完全一样, 这与 SPRT 包含所有的 $s pa(s, t)$ 定义相矛盾. 所以, 该 SPRT 是唯一的.

设网络只有一个簇 C , 簇中的点为 $\{1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}$, 它们与中转接点, sink 节点构成的网络结构如图 1 所示, 根据定义 1, 节点 12, 5, 8 到 sink 节点的 SPRT 如图 2(a)、图 2(b)、图 2(c) 所示.

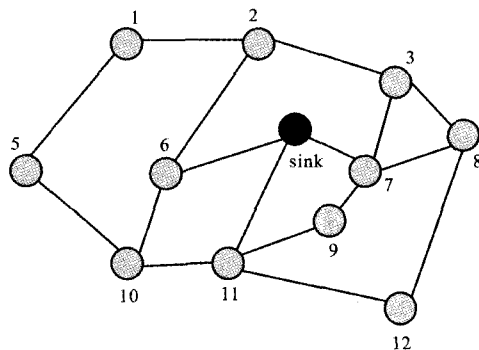


图 1 拓扑网络 1

定理 2^[8] 对于给定的任意一棵 SPRT, 从根节点(源节点)到叶子节点(目的节点)传输数据的可靠性可表示为

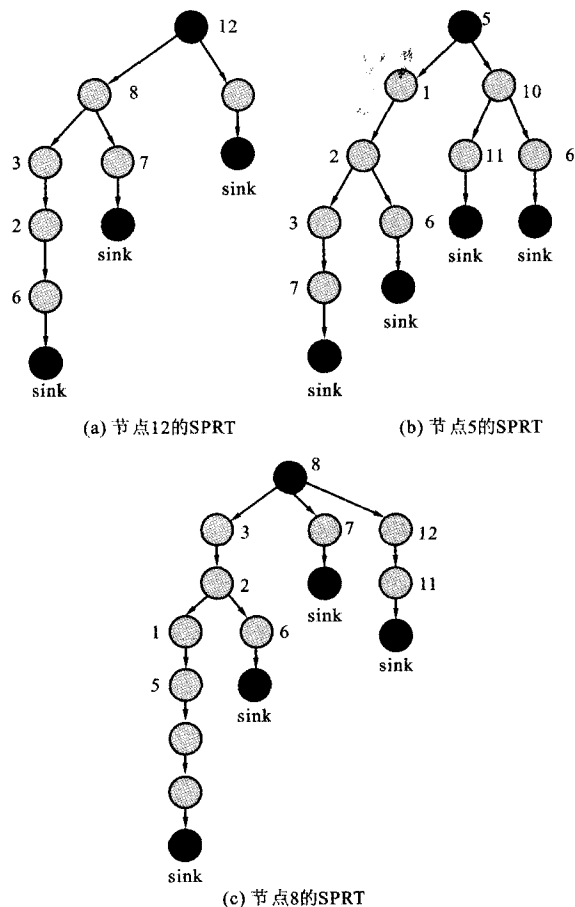


图2 节点12的SPRT

$$R(G) = \sum_{i=1}^m (1 - R(G_i)) P(spa_i), \quad (2)$$

式中, $s pa_i$ 表示 SPRT 中的第 i 条最简路, $P(spa_i)$ 为 $s pa_i$ 有效的概率.

G_i 是这样生成的: 将 G 的源点 s 作为 G_i 的源点 s , G 的汇点 t 作为 G_i 的汇点 t , 每一 $s pa_k (k < i)$ 路上的任一节点 w_j , 如果:

- (1) $s \rightarrow w_j$ 路在 $s pa_i$ 路上, 则将该路融入 s ;
- (2) w_j 是中间节点, 而且 w_j 在 $s pa_i$ 路上, 那么删除 w_j , 将其父亲和儿子连接;
- (3) $w_j \rightarrow t$ 路在 $s pa_i$ 路上, 则将该路融入 t , 得到 G_i 的第 k 条最简路;
- (4) 若有一条路的节点集合的子集是另一条路的节点集合, 则删除该路, 得到 G_i 的所有最简路, 路上除 s, t 点外没有 $s pa_i$ 的节点;
- (5) G_i 由这些最简路并联组成.

该定理给出了求解 WSNs 可靠性的一个快速的计算公式, 用这种方法来计算网络的可靠性可以大大缩减计算的复杂性, 提高运算速度, 节省能量.

3 无线传感器网络快速算法

算法描述:

算法中用到的一些符号表示的意义如下:

s : 指示初始状态节点;

$v_i(\bar{v}_i)$: 表示节点 v_i 的状态为运行(失效);

$p_i(\bar{p}_i)$: 表示节点 v_i 的状态为运行(失效)的概率;

SPRT: 搜索过程所得到的有序根树;

OPEN 表: 存放未扩展节点的表;

CLOSED 表: 存放已扩展节点的表;

$S(v)$: 当前扩展节点 v 生成的不是自己先辈且不是先辈兄弟的后继节点集.

依次对簇中节点进行如下操作:

- (1) 输入概率图 G 及相应的源点 s 和汇点 t , $R(\emptyset) = 0, i = 1$;
- (2) 把 s 放入 OPEN 表中;
- (3) 建立 CLOSED 表, 且置为空表;
- (4) 判断 OPEN 表是否为空表, 若为空, 则输出 $R(G)$, 退出;

(5) 选择 OPEN 表中的第一个节点, 把它从 OPEN 表中移出, 并放入 CLOSED 表中, 将此节点记为 v , 设置一个指向父节点的指针;

(6) 考察节点 v 是否为目标节点 t , 若是, 则找到一条最简路 $s pa_i$. 最简路即为从图 G 中沿着指针从 t 到 s 的这条路径得到, 利用定理, 生成 G_i 的所有最简路. 若 G_i 的任意两个最简路除了 $\{s, t\}$ 外没有共同的节点, 则:

$$R(G) = R(G) + (1 - \prod_{i=1}^m P(spa(G_i)_i)) P(spa_i) \quad (3)$$

式中, m 表示 SPRT 中最简路数.

否则, 利用 J. A. Abraham 算法^[9] 递归计算 $R(G_i)$: $R(G) = R(G) + (1 - R(G_i)) P(spa_i)$

(7) 扩展节点 v 生成一组不是自己先辈且不是先辈兄弟的后继节点集, 并将它们记作集合 $S(v)$, 若 $S(v) = \emptyset$, 则在 CLOSED 表中删除节点 v , 转(4);

(8) 将 $S(v)$ 中的节点加入到 OPEN 表中;

(9) 按深度优先策略重排 OPEN 表中节点的顺序, 转(4).

4 算例演示及算法复杂度分析

4.1 算例演示

下面通过一个具体的例子来分析算法的执行过程以及算法实施的复杂性. 假设 WSNs 中只有一个簇, 簇中节点和中转节点、sink 节点构成的网络拓

扑结构如图 3 所示,对应于 sink 节点外每个节点的 SPRT 如图 4 所示.

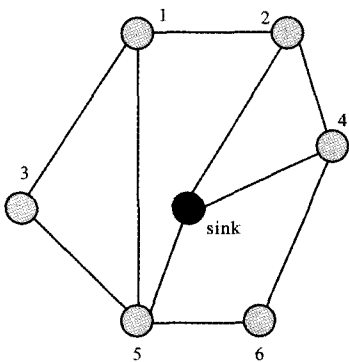


图 3 拓扑网络 2

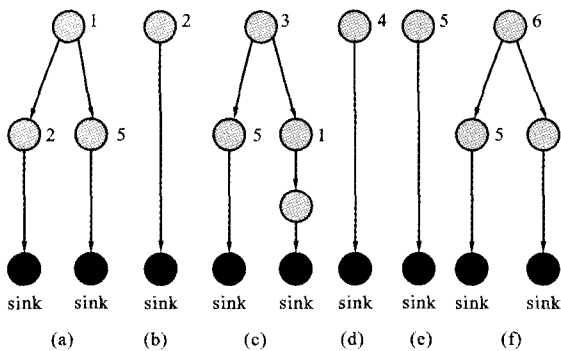


图 4 各节点对应的 SPRT

分别对各个节点生成的 SPRT 利用以上算法进行求解,为了方便书写,表中所有的 s 指的都是 sink 节点. 各节点的计算过程如表 1 所示.

表 1 WSNs 的 spa 路及生成的 G_i

图标	I	spa_i	G_i
(a)	1	12s	$\emptyset$
(a)	2	15s	2
(b)	1	2s	$\emptyset$
(c)	1	35s	$\emptyset$
(c)	2	312s	5
(d)	1	4s	$\emptyset$
(e)	1	5s	$\emptyset$
(f)	1	65s	$\emptyset$
(f)	2	64s	5

假设节点 1,2,3,4,5,6 到 sink 节点的可靠性分别用 $R(G_1), R(G_2), R(G_3), R(G_4), R(G_5), R(G_6)$ 来表示,则由定理可得到

$$R(G_1) = (1 - R(G_1))P(spa_1) + (1 - R(G_2))P(spa_2) = P(v_1 v_2 s) + (1 - p_2)(v_1 v_5 s) = p_1 p_2 p_s + p_2 p_1 p_s p_s$$

同理可得

$$\begin{aligned} R(G_2) &= p_2 p_s, \\ R(G_3) &= p_3 p_5 p_s + (1 - p_5) p_3 p_1 p_2 p_s, \\ R(G_4) &= p_4 p_s, \\ R(G_5) &= p_5 p_s, \\ R(G_6) &= p_6 p_5 p_s + (1 - p_5) p_6 p_4 p_s, \end{aligned}$$

整个网络的可靠性可表示为

$$R(G) = \prod_{i=1}^k R(G_i) = R(G_1)R(G_2)R(G_3)R(G_4)R(G_5)R(G_6) = p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_s^6 (p_2 + \overline{p_2} p_5) (p_5 + \overline{p_5} p_2 p_1) (p_5 + \overline{p_5} p_4)$$

4.2 算法复杂度分析

定理 2 给出了计算 WSNs 的一个简洁公式,充分利用了 WSNs 及 G_i 的拓扑结构,大大减化了可靠性计算的工作量. 使用定理 2 计算 WSNs 网络分为以下步骤:

(1) 将计算 $R(G)$ 分解成两部分计算,一部分是 $R(G)_1$,其包含的最简路是两两不交的,可以直接计算;另一部分是 $R(G)_2$,其分解成若干个更小的无圈有向网络 G_i 的可靠性 $R(G_i)$.

(2) 这是一个递归公式,在计算 $R(G)$ 及 $R(G_i)$ 之前,可以利用各种可靠性保护缩减对 G 及 G_i 进行化简. 例如串联缩减、并联缩减等. 由于进行这些缩减仅要求线性时间,但缩减后计算量却呈指数级减少,大大缩减了计算的工作量.

(3) 可以生成简洁的 WSNs 网络的最简路可靠性表达式.

算法的执行过程是通过算法的定义,以及算例的演示,可以看出最终计算是通过每个节点的 SPRT 来完成的,而该过程中生成的 SPRT 是非常简单的,其中生成的最简路的个数比用普通的生成树算法生成的树中路路的个数少很多,直接使用容斥原理或枚举所有可能的路径的算法要比该算法复杂得多,而且计算工作量非常大,最后所用到的表达式也很长.

5 结束语

感应器失效的节点通常发送错误数据,干扰全局信息判断,对网络监测信息的准确性、完整性和时效性造成直接影响,传感器网络数据传输可靠性的高低直接关系到网络的性能. 然而,复杂的可靠性计算方法不仅运算量大,而且计算过程会使网络的能量大大消耗. 本文阐述了一种简单、快速的 WSNs

可靠性计算方法,通过可靠性计算的公式估算出节点失效对网络监测可靠性的影响程度.为整个网络的可靠性衡量提供了依据.算例演示以及算法分析表明,用该算法来求解簇状网络的可靠性问题是可行的、高效的.

参考文献:

- [1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102—114.
- [2] Gao Jianliang, Xu Yongjun, Li Xiaowei. Weighted median based distributed fault detection for wireless sensor network[J]. Journal of Software(in Chinese), 2007, 18(5): 1208—1217.
- [3] Tulone D, Madden S. An energy-efficient querying framework in sensor networks for detecting node similarities[C] //Proc of IEEE Int Symp on Modeling, Analysis and Simulation in Sensor Networks. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 191—300.
- [4] Sankarasubramaniam Y, Akano B, Akyildiz IF. ESRT: event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks[C] //Procof the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking & Computing. New

York: ACM Press, 2003: 177—188.

- [5] 杨显辉,任洪娥,景维鹏.一种能量感知无线传感器网络可靠协议研究[J].微电子学与计算机,2010,8(27):194—197.
- [6] Olympia T R, Carlier J G. Factoring and reductions for networks with imperfect vertices [J]. IEEE Trans on Reliability, 1991, 40(2): 210—217.
- [7] 徐冉,高随祥,董萍,等.无线传感器网络的可靠性计算[J].计算机应用研究,2009,26(03):987—990.
- [8] 高飞,张少中,王光兴.计算无线通信网络2-终点可靠性的快速算法[J].计算机学报,2007,30(6):1035—1039.
- [9] Abraham J A. An improved algorithm for network reliability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1979, 28(1): 58—61.

作者简介:

徐雪鑫 女,(1984—),硕士研究生.研究方向为计算机网络、网络可靠性.

梁家荣 男,(1966—),博士,硕士生导师.研究方向为人工智能、控制理论与应用.

宋小天 男,(1985—),硕士研究生.研究方向为计算机网络.

(上接第94页)

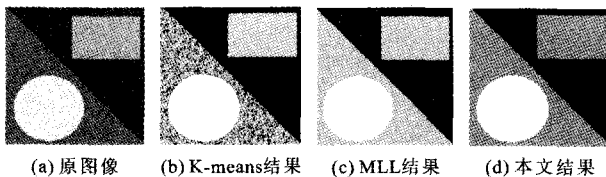


图2 分割结果

6 结束语

本文利用Ward聚类算法将图像进行了初始分割,在此基础上,MRF模型以Ward聚类结果作为初始分割,采用FGM描述图像像素灰度的条件概率分布,由像素分布条件概率函数形式与GMM参数类比,采用EM算法估计概率模型参数.区域分布先验概率采用Ising模型,用ICM局部优化方法,获得MAP准则下的图像分割结果.这种方法在迭代次数较少的情况下,能有效提高分割精度和抗噪声能力,这种算法使分割效果得到很好改善.

参考文献:

- [1] Geman S, Geman D. Stochastic relaxation, gibbs distri-

butions, and the bayesian restoration of images [J]. IEEE Trans Pattern Anal & Mach Intell, 1984, (6): 721—741.

- [2] Stan Z Li. Markov random field modeling in image analysis[M]. London:Pringer—Verlag, 2009.
- [3] Dubes R C, Jain A K, Nadabar S G, et al. MRF model-based algorithms for image segmentation[C]// Proceedings of 10th International Conference on Pattern Recognition. Atlantic city, NJ: IEEE, 1990: 808—814.
- [4] Douglas A Reynolds, Richard C Rose. Robust text-independent speaker identification using gaussian mixture speaker models[J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 1995, 1(3): 72—83.
- [5] Richard O Duda, Perter E Hart, David G Stork. 模式分割[M]. 2版. 李宏东,姚天翔,译. 北京:机械工业出版社, 2003.

作者简介:

苗晓锋 男,(1972—),副教授.研究方向为嵌入式技术、计算机应用技术.