

MANET 中自组织的间断性故障监测方法

李阳辉, 曾志文, 陈志刚, 赵明

(中南大学信息科学与工程学院, 长沙 410083)

摘要: 基于分段连续监测的思想, 提出一种在 MANET 中采用累计信任度判断节点间断性故障的监测方法, 在单次监测中利用信息熵记录节点响应频率, 通过共享信息熵, 并根据伪空间距离联合诊断节点的间断性可知, 该单次监测方法的效率高于已有方法, 为进一步提高节点高速运动的监测准确性, 通过分段连续监测, 把单次监测结果作为分类器, 计算节点的累计信任度, 并通过累计信任度衡量节点的间断性。仿真实验结果表明, 该方法是有可行性的。

关键词: 移动自组网; 间断性故障监测; 信息熵; 累计信任度

Self-configurable Approach for Intermittence Fault Monitoring in MANET

LI Yang-hui, ZENG Zhi-wen, CHEN Zhi-gang, ZHAO Ming

(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

【Abstract】 On basis of the series of subsection monitoring thought, this paper proposes an approach which uses cumulative trust to measure intermittent failure in Mobile Ad hoc NETWORK(MANET). In the one-time monitoring, the information entropy is used for taking down the intermittent of nodes response, and a new distributed monitoring scheme with several collaborative detection methods based on pseudo-space distance are defined in this paper. This approach is much better than the old. In order to improve on the veracity of detection when nodes with high mobility, by the series of subsection monitoring, the monitoring results are seen as classifiers, and the intermittent failure is measured by the cumulative trust. Simulation experimental results show this approach is effective and feasible.

【Key words】 Mobile Ad hoc NETWORK(MANET); intermittence fault monitoring; information entropy; cumulative trust

1 概述

移动自组网(Mobile Ad hoc NETWORK, MANET)^[1]是由一系列动态的主机节点临时组成的一种多跳无线网络。它不存在固定的网络基础设施, 能够快速展开, 网络中的每个节点都带有无线收发装置, 能够快速运动, 具有较强的容错性和鲁棒性, 能够在战场、救灾等场合快速部署。但移动自组网中的节点由于易受到的恶劣环境、自身故障等因素的影响。如战时军用自组网中, 节点很容易受到敌方火力攻击, 或者针对自组网的攻击, 导致节点出现故障, 影响网络的正常运转。因此, 对节点的故障监控和诊断是关系到移动自组网安全运转的一项重要内容。故障诊断在固定网络中的研究由来已久。流行的网络管理系统中一般都包括该项功能, 而在移动自组网中, 节点完全性崩溃比较容易监测, 而对于间断性故障, 则由于自身特有的移动性, 网络的多跳性与松散的分分布式结构, 导致监测异常困难。自身特有的移动性, 可导致节点出现间断性响应的假象(文中称为正常性间断), 而松散的分分布式结构, 则让对节点的监控出现了困难。

对于这种间断性节点故障, 本文提出基于分段连续监测的思想, 采用累计信任度自组织监测(Self-Configurable Monitoring by Cumulative Trust, SCMCT)来判断节点间断性故障。

2 正常性间断与间断性故障

在移动自组网中, 节点响应间断性可以分为 2 种: (1)由于节点自身和其他节点的移动, 而使得对应链路中断, 经过

一定时间又重新建立, 导致让邻居节点监测出间断性故障的假象; (2)节点自身出现了真实的故障, 对外表现出不正常的间断性行为。

导致这种间断性故障的因素有很多: (1)节点能量不足, 如节点所用电池即将用完, 导致节点的响应出现间断。(2)节点底层损坏, 如节点物理层出现故障, 或者节点配置丢失, 导致节点的响应不稳定。(3)节点异常的移动现象, 如节点围绕某个节点做钟摆运动或者做近似的圆周运动, 与节点的正常移动模式有明显差异。(4)节点基于自身考虑如节省能量, 或者遭到攻击, 而使得响应速度减慢, 如不转发某些报文、路由失败等。

对间断性故障的监测关键就是要能够很好地区分间断性故障和正常性间断这 2 种现象。

3 邻居节点对间断性故障的察觉与监测

如果某个节点出现间断性故障, 那么最先知道的是它的邻居节点(这里认为节点是自私的, 每个节点都认为自己是正常的)。一种好的察觉方式既原本应是周期性响应(如先验式路由协议)的报文而节点没有周期性的响应, 而表现出混乱的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60873082); 国家部委预研基金资助项目

作者简介: 李阳辉(1985—), 男, 硕士, 主研方向: 移动自组网, 无线传感器网络; 曾志文, 副教授; 陈志刚, 教授、博士生导师; 赵明, 博士

收稿日期: 2009-10-10 **E-mail:** lyxh.2003@gmail.com

响应。如在 OLSR 路由协议中, 节点定期地向邻居节点广播 hello 报文。如果某个节点收到它的邻居节点的 hello 报文在时间上混乱, 那么它认为这个邻居节点是不正常的, 出现了间断性故障。

文献[2]详细描述了这种现象。本文算法(SCMCT)利用信息熵描述这种混乱现象。

设定移动自组网中节点集为 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 给定总的监测时间 T , 节点向邻居节点发生 hello 报文的周期为 r , 把监测时间 T 分为 k 等分, 即 $t=T/k, t \gg r$ 。监测每个 t 时间段内节点 v_i 收到节点 v_j 的报文数量 $C_{i,j}$, C_{\max} 为节点在 t 时间内, 最多收到它某个邻居节点的 hello 报文数量。考虑到在同等级网络中有:

$$C_{\max} = \frac{t}{r} = \frac{T}{kr} \quad (1)$$

设某个时间点节点正常的概率为 p , 节点不正常的概率即为 $1-p$, 那么在 t 时间内, 节点 v_i 收到节点 v_j 的报文数量 $C_{i,j}$ 服从二项分布, 即

$$P(C_{i,j} = X) = C_{C_{\max}}^X p^X (1-p)^{C_{\max}-X} \quad (2)$$

对 $C_{i,j}$ 进行离散处理:

$$C'_{i,j} = C_{i,j} / N, C'_{\max} = C_{\max} / N \quad (3)$$

根据 Shannon 的熵定义公式, 有:

$$H(C'_{i,j}) = \sum_{X=0}^{C'_{\max}} P(C'_{i,j} = X) \cdot \log \left(\frac{1}{P(C'_{i,j} = X)} \right) \quad (4)$$

注意到熵主要用来衡量收到节点 hello 报文的时间混乱程度, 而混乱程度受节点移动性的影响是最大。如何限制节点移动对熵的影响, 即优化总的测量时间 T , 单位测量时间 t , 已经超出了本文的范围, 不再讨论。

4 分布式联合诊断方法

一个节点对它邻居节点的诊断并不一定是正确的, 例如, 一个间断性故障节点对一个正常的节点诊断时, 很有可能把正常的节点诊断为错误的。

同时, 由于节点的移动性, 在整个的测试时间 T 内, 2 个节点很难一直维持邻居关系, 即要求一个节点全过程的对另一个节点诊断是相当困难的。于是各个节点共享诊断信息, 进行联合诊断是非常必要的。

在 v_i 节点完成诊断, 且计算出 T 时间内, 邻居节点的熵 $\{v_j, H(C_{i,j})\}$, v_i 计算出的所有邻居节点的熵组成一个熵序列 I_i , 然后采用如同 OLSR 中的限制性洪泛(只选择 MPR 节点进行洪泛), 把熵序列与其他节点共享。每个节点利用共享的熵信息聚合成熵矩阵 M , 熵矩阵初始化 $M[i,j]=-1$, $M[i,j]$ 表示节点 v_i 在测试时间 T 内, 测得的对节点 j 的熵 $H(C_{i,j})$ 。熵矩阵 M 的每列 $\{M[1,j], M[2,j], \dots, M[n,j]\}$, 即组成其他所有节点对 v_j 节点的诊断熵, 作为节点 v_j 的诊断熵向量 H_j 。考虑最佳情况, 即所有节点是静止的, 并且不存在间断性故障节点, 如果节点 v_i 和节点 v_j 是直接邻居关系, 节点 v_i 对节点 v_j 有诊断熵, 即如果 $M[i,j] \neq -1$, 那么 $M[i,j]=0$, 即在 N 维空间中, j 的诊断熵向量 H_j 就位于该空间的原点。考虑以 H_j 到 N 维空间原点的中心距 R 为评价指标, 如 R 越大, 那么该节点是故障节点的可能性就越大, 否则可能性就越小。本文中把 R 称为伪空间距离, 有:

$$R = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\sum_{i \neq j, M(i,j) \neq -1} M_{(i,j)}^2} \quad (5)$$

其中, $N = |M_{(i,j)}\{i \neq j \cap M_{(i,j)} \neq -1\}|$ 。

问题的关键在于对 R 值的判定上, 当 $r \ll t$ 时, 对于正常节点, 节点 v_i 测试到的节点 v_j 的熵, 实际上即是该链接维持时间的信息熵。在节点低速运动的情况下, 对于 R 的阈值可设定为, 单跳链路维持时间的概率分布的熵 E 。如果 $R > E$ 即判定该节点是故障性节点, 否则即为正常的节点。

当网络中的节点处于高速运动时, 节点的运动导致链路稳定性迅速下降, 节点的高速运动对监测的干扰明显, 监测效果也随之变差。

考虑到监测是连续的, 每次测试都会得到一个测试结果 TR , 所有的监测结果组成测试结果序列 TR_LIST 。可利用多次的监测结果来提高监测的准确性。本文算法采用 Dempster-Shafer 证据理论^[3]处理监测结果集。把每次的监测结果作为一个分类器, 定义信任分配函数 m 如下:

$$TR = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$$

其中, n 为监测结果中监测到的节点数目; R_i 为一次监测中 v_i 的伪空间距离; $\min_R = \min\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$, 即一次监测结果中最小的伪空间中心距离。

$$m(j) = \frac{R_j - \min_R}{\sum_{i=1}^n (R_i - \min_R)} \quad (6)$$

为减小节点的计算和存贮压力, 每次监测只考虑提取伪空间距离最大的 w 个节点。如先验故障概率为 η , 网络节点数为 N , 那么可取:

$$w = N\eta \quad (7)$$

由于监测结果中节点的离散性, 因此不能使用传统的 Dempster-Shafer 对信任度进行计算, 本文采用累计迭代的方法来处理每次实验后的信任度, 得到累计信任度, 即:

$M_k(i)$ 为第 k 次试验后认为 v_i 节点是故障节点的信任度, 如监测结果中 $m(j)$ 不存在, 即按 $m(j)=0$ 处理。

$$M_{k+1}(i) = \frac{(M_k(i)k + m(j))}{k+1} \quad (8)$$

5 SCMCT算法描述

单次监测算法如下:

(1)初始化

节点 i 的 hello 包统计数组 hello[][] 初始化;

节点 i 的计时器(timer)初始化为 0;

节点 i 的监测熵矩阵初始化 $M[i,j]=-1$ 。

(2)监控

while(timer<T){

if 节点 i 收到节点 j 的 hello 包

hello[j][timer/t] += hello[j][timer/t];

timer++;

}

(3)熵计算

根据 hello 统计数组, 利用 Shannon 的熵公式计算熵 $\{v_j, H(C_{i,j})\}$, 组成节点 i 的监测熵序列 I_i ;

(4)联合诊断

利用限制性洪泛, 节点 i 把自己的监测熵序列 I_i 广播出去, 同时接收其他节点的监测熵序列。组成监测熵矩阵 $M[i,j]$;

利用 $M[i,j]$ 计算伪空间距离 R , 根据伪空间距离判断节点是否出现故障。

分段连续监测算法:

(1)初始化

每个节点的累计信任度初始化 $M_i=0$;

(2)伪空间距离序列获取

每个节点都使用图 1 的单次监测方法获取伪空间距离序列 TR;

(3) 累计信任度计算与判定

通过累计信任度 τ 计算累计信任度 M , 利用累计信任度来判断;

(4) 迭代

返回(2)继续获取伪空间距离序列。

6 实验模拟与效果分析

整个实验在 NS2 中进行, 移动自组网的节点数为 100 个, 模拟区域为 1500×600 的方形区域, 测试时间 T 为 360 s。MAC 层采用通用的 IEEE 802.11b, 路由协议采用 OLSR。模拟节点数为 100 个, 拟故障节点为 10 个, 节点移动模型为 RWP。

定义 TP 为监测到的故障节点数目, TN 为监测到的正常节点数目, FP 为未监测到的故障节点数目, FN 为未监测到的正常节点数目, Sn 为灵敏度, Sp 为特异度, Md 为误判率。

$$Sn = \frac{TP}{TP + FN}, Sp = \frac{FP}{FP + TN} \quad (9)$$

$$Md = \frac{TN}{TN + FN} = 1 - Sp \quad (10)$$

设在 RWP 中, $pause=30$ s, $MaxSpeed=10$ m/s, 进行 10 次测试后, 利用 ROC 曲线将文献[2]中的 m3 方法与本文单次监测算法 m4 进行比较, 如图 1 所示。

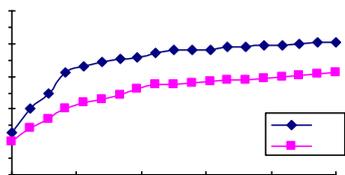


图 1 单次监测方法实验比较

从图 1 可以看出, 经过离散化包计数与采用伪空间距离的联合诊断后, 监测的效率提高明显, 特别当误测率接近 20% 的最高许可时, 灵敏度提高了将近 10%。同时, 在误测率较小时, 曲线斜率较大, 灵敏度提高很快。而随着误测率的增大, 灵敏度的提高相对较小。考察当 $Md=4.5\%$ 时, Sn 和速度(speed)的关系, 在实验中, $pause=30$ s, $T=180$ s, 测试结果如图 2 所示。

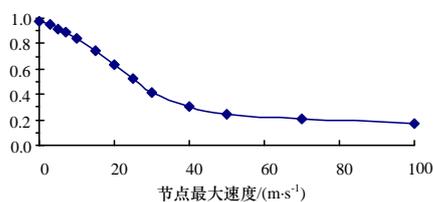


图 2 灵敏度与 $MaxSpeed$ 的关系

从图 2 可以看出, 在网络节点处于低速运动时, 监测的灵敏度比较高, 但随着网络节点运动速度的提高, 监测的灵敏度下降很快, 当节点的最大速度达到 30 m/s 时, 在误测率为 4.5% 时, 灵敏度只能达到 42%, 而当速度达到 50 m/s 时, 灵敏度只有 25%。

当网络最高速度 $MaxSpeed=40$ m/s 时, 设置故障节点为 0~9 个节点, 在连续 15 次实验测得的 10 个最大伪空间距离后, 利用信任度分配函数 m 计算每次实验的初始信任度如图 3 所示。

序号	节点及其初始信任度(%)										
1	66/0.00	75/0.83	50/2.48	8/2.48	56/3.31	78/4.13	54/6.61	30/13.22	0/16.53	2/19.83	5/30.58
2	13/0.00	15/0.52	52/2.59	84/5.18	1/7.77	57/8.29	33/8.29	11/9.84	69/12.95	8/15.54	9/29.02
3	98/0.00	18/1.19	37/1.19	97/2.38	7/3.57	44/4.76	4/4.76	1/6.55	39/11.90	34/18.45	6/45.24
4	97/0.00	42/2.61	6/2.61	88/4.58	18/5.23	89/5.88	55/7.19	38/7.84	7/12.42	1/13.73	3/37.91
5	73/0.00	67/1.46	37/6.34	72/6.83	81/7.80	0/7.80	87/8.29	85/11.22	3/14.63	8/15.12	6/20.49
6	92/0.00	77/2.29	28/3.05	47/3.05	70/4.58	9/4.58	91/6.11	48/12.98	4/14.50	75/16.03	1/32.82
7	2/0.00	8/3.05	3/3.82	33/3.82	48/7.63	42/9.92	4/11.45	7/11.45	1/12.98	26/17.56	28/18.32
8	44/0.00	9/1.99	52/4.64	2/4.64	29/6.62	0/6.62	23/7.28	70/7.95	25/14.57	5/15.23	8/30.46
9	95/0.00	66/3.52	5/3.52	16/5.47	72/7.03	63/7.42	25/8.98	56/12.89	7/15.23	3/17.58	9/18.36
10	63/0.00	81/1.30	9/2.60	61/2.60	15/5.19	76/7.79	65/10.39	4/10.39	94/14.29	6/19.48	77/25.97
11	46/0.00	53/1.11	25/2.22	1/3.33	72/5.56	84/7.78	4/8.89	30/12.22	90/12.22	36/14.44	7/32.22
12	33/0.00	65/0.00	95/1.56	3/2.34	56/6.25	91/7.03	9/11.72	72/14.84	32/15.62	4/15.62	54/25.00
13	41/0.00	96/0.61	8/0.61	27/2.44	9/3.05	81/7.32	99/12.80	18/12.80	4/17.68	76/19.51	0/23.17
14	83/0.00	9/0.00	62/3.57	33/5.95	94/7.14	90/7.14	1/10.71	96/10.71	85/10.71	0/14.29	49/29.76
15	56/0.00	61/0.88	39/4.42	95/5.31	7/5.31	82/7.08	4/7.96	32/7.96	77/11.50	9/21.24	2/28.32

图 3 实验初始信任度

从图 3 可以看出, 当最大速度达到 40 m/s 时, 单次监测的效果已经表现得很低下, 接近于 36%, 即单次监测的结果难以用来准确判断节点是否故障。以信任度为标准, 通过对累计 k 次实验后, 计算累计信任度如图 4 所示在信任度最高的 10 个节点中, 故障节点的概率统计如图 5 所示。

序号	节点及其初始信任度(%)									
1	75/0.83	50/2.48	8/2.48	56/3.31	78/4.13	54/6.61	30/13.22	0/16.53	2/19.83	5/30.58
2	57/4.15	33/4.15	11/4.92	69/6.48	30/6.61	0/8.26	8/9.01	2/9.92	9/14.51	5/15.29
3	69/4.32	30/4.41	1/4.77	0/5.51	8/6.01	34/6.15	2/6.61	9/9.67	5/10.19	6/15.08
4	7/4.00	0/4.13	8/4.51	34/4.61	2/4.96	1/7.01	9/7.25	5/7.64	3/9.48	6/11.96
5	7/3.20	34/3.69	2/3.97	0/4.87	1/5.61	9/5.80	5/6.12	8/6.63	3/10.51	6/13.67
6	34/3.08	4/3.21	2/3.31	0/4.06	5/5.51	8/5.52	9/5.60	3/8.76	1/10.14	6/11.39
7	28/3.05	0/3.48	7/3.92	5/4.37	4/4.39	9/4.80	8/5.17	3/8.05	6/9.76	1/10.55
8	2/3.06	7/3.43	4/3.84	0/3.87	9/4.45	5/5.73	3/7.04	8/8.33	6/8.54	1/9.23
9	2/2.72	4/3.41	0/3.44	7/4.74	5/5.48	9/5.99	8/7.41	6/7.59	1/8.21	3/8.22
10	77/2.83	0/3.10	4/4.11	7/4.27	5/4.93	9/5.65	8/6.67	1/7.38	3/7.39	6/8.78
11	77/2.57	0/2.81	5/4.48	4/4.54	9/5.14	8/6.06	3/6.72	7/6.81	1/7.02	6/7.98
12	54/2.63	72/2.85	5/4.11	4/5.47	8/5.56	9/5.69	7/6.24	3/6.36	1/6.43	6/7.32
13	72/2.64	5/3.79	0/4.16	8/5.17	9/5.49	7/5.76	3/5.87	1/5.94	4/6.41	6/6.76
14	72/2.45	5/3.52	8/4.81	0/4.89	9/5.09	7/5.35	3/5.45	4/5.95	6/6.27	1/6.28
15	5/3.29	2/3.52	8/4.48	0/4.56	3/5.09	7/5.35	6/5.85	1/5.86	4/6.08	9/6.17

图 4 实验累计信任度

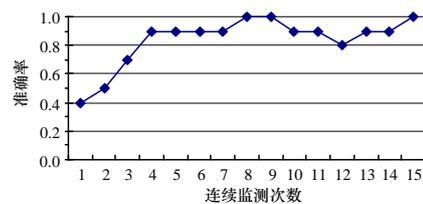


图 5 连续监测次数与准确率

从图 5 可以看出, 使用累计信任度对试验效果的提高非常明显, 随着连续试验次数的提高(次数在 4 次以上)时, 该方法的准确率已经达到一个非常好的水准(>80%), 对误差数据的抵御能力也明显提高。

7 结束语

本文分析间断性故障产生的一些原因以及节点移动对其的判断的影响, 提出基于分段连续监测的思想, 采用累计信任度判断节点间断性故障的监测方法(SCMCT), 即使在高速运动网络中也能达到很高的准确率。但该方法的一个缺点是节点的计算复杂度较高, 开销较大。

下一步工作将对此方法进行优化, 以来减小其计算复杂度。同时, 也可以把监测结果纳入 MANET 管理框架中, 如 ANMP^[4]。(下转第 114 页)