

# 基于网络断层扫描的传感器网络链路丢包研究

吴光伟<sup>1</sup>, 刘双艳<sup>1</sup>, 宋 进<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学 电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 中国电子科技集团公司第三十三研究所, 山西 太原 030006)

**摘 要:**文中提出了一种基于网络断层扫描的无线传感器网络链路丢包率测量方法,通过边界节点的丢包率来估计传感器内部链路丢包的情况。根据无线传感器网络数据聚合的特点,提出了网络逻辑拓扑和链路报文丢包模型,在将链路报文丢失率推测问题形式化为MLE问题的基础上,用引入修正因子的 $\mu$ 的EM算法来推测链路报文丢失率。NS2仿真结果证明, $\mu$ -EM算法推测的链路报文丢失率与预设值更加接近,特别是在大规模网络中 $\mu$ -EM算法在精确度和有效性方面均明显优于EM算法。

**关键词:**无线传感器网络;网络断层扫描;链路丢包率

**中图分类号:**TP31

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2012)03-0064-03

## Research on Link Loss Rate in Wireless Sensor Network Based on Network Tomography

WU Guang-wei<sup>1</sup>, LIU Shuang-yan<sup>1</sup>, SONG Jin<sup>2</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. The 33th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** It proposes a link packet loss measurement method based on network tomography techniques in wireless sensor network, estimates the internal link loss of sensor network through the packet loss rate of boundary nodes. According to the characteristics of data aggregation, a network logical topology and a link loss rate model of sensor network is proposed. Based on link loss rate is formulated as a maximum-likelihood estimation problem, the EM algorithm with correction factor of  $\mu$  is introduced to infer it. Simulation results of NS2 demonstrate that link packet loss rate with use of  $\mu$ -EM algorithm is more close to the default value, especially the  $\mu$ -EM algorithm is much better than the EM algorithm in large-scale network.

**Key words:** wireless sensor network; network tomography; link loss rate

## 0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)由大量低成本的微型传感器节点组成,通过自组织网络协作地实现所部属区域的感知信息收集、处理和传输任务,近年来被广泛应用于智能交通、应急救援、环境监测、工农业和军事应用等领域。相对与传统计算机网络,无线传感网络容易受到节点环境、通信介质等条件的影响,其节点间通信出现故障的频率较高,为保证无线传感网络的服务质量,需要一种较为有效的网络性能测量和评估方法。

在无线传感器网络中,严重链路报文丢失和延迟超长等现象将造成链路失效、链路降级等故障,链路故

障将严重降低传感器网络的通信性能、服务质量和应用效果。文中结合传感器网络的特点,以链路报文丢包率为例,论述网络断层扫描技术在无线传感器网络性能推测中的应用。

## 1 研究现状

目前,传感器网络链路性能测量可分为传统测量和端到端测量两种,传统测量技术需要通过内部节点协同,测量精度较高。但由于传感器网络节点较多以及受到自身能量和通信介质的限制,从网络内部每个节点收集性能信息进行分析和处理的内部测量方法并不适合于传感器网络。

端到端测量技术又称为网络断层扫描技术(Network Tomography, NT)<sup>[1]</sup>,即通过测量网络边界上的节点来进行端到端数据的收集,根据收集到的数据信息采用统计学理论来推测无线网络内部的性能(比

收稿日期:2011-08-11;修回日期:2011-11-15

基金项目:兰州市科技计划基金资助项目(2009-1-5)

作者简介:吴光伟(1987-),男,山东郓城人,硕士研究生,研究方向为无线传感器网络、网络性能测试。

如,链路丢包率、延时等)。在传感器网络中,内部节点周期性地发送业务数据到聚合节点<sup>[2]</sup>,聚合节点被动检测业务数据的报文就可以获取到报文丢失和延迟的测量值。

目前,链路丢包率推测技术的研究主要集中在传统互联网络中,专门针对无线传感器网络的研究相对较少。文献[3]根据在聚合节点得到的数据信息,通过因子图和EM算法来推测内部节点或链路上的报文丢失情况,但该方法存在过低估计等缺陷。文献[4]作者将报文丢失率推测问题形式化为MLE问题,然后采用EM算法加以解决,该方法可以有效推测出链路丢包率,但是计算复杂度较高。文献[5]通过将原始似然极大化问题变换为伪似然估计(Pseudo Maximum Likelihood Estimation, PMLE)问题来减小计算复杂度,但测量结果误差较大。文中在MLE-ME算法的基础上引入动态变化的修正因子 $\mu$ ,由 $\mu$ 控制估计值修正比例,使EM迭代时更加有效地修正估计值,使测量值更加逼近真实值。

## 2 网络与性能模型

### 2.1 网络拓扑模型

为节省节点能量和带宽,传感器网络在数据收集过程中常采用数据聚合技术,即将不同节点测得的一个或多个数据包聚合成一个包传输给上层聚合节点<sup>[6,7]</sup>。由此特点,可以将传感器网络的拓扑结构抽象成如图1所示的倒立逆向聚合树 $T=(V, E)$ ,  $V$ 表示节点集合,  $E$ 表示链路集合。  $S$ 表示探测源节点 Sink;  $e_i$ 表示从节点  $i$  到节点  $j$  的链路,  $P_{i-k}$  表示节点  $i$  到节点  $k$  的路径。  $g(i) = \{i \in V | (k, i) \in E\}$  表示子节点集合在图1中,  $s$  节点为根节点, 节点3~7为叶子节点, 其

者链路负载情况发生变化,或者根据任务要求由拓扑控制算法进行调整<sup>[8]</sup>,文中为了便于进行仿真实验,假设网络拓扑在测量的较短时间内不发生变化。

### 2.2 报文丢失率模型

在测量研究中,一般假设链路报文丢失是相互独立的贝努利(Bernoulli)过程<sup>[9]</sup>,用随机过程 $Z=(z_{i,j})$ ,  $i \in g(j)$ ,  $j \in V$ 表示流经倒立聚合树的数据流,其中 $z_{i,j} \in \{0, 1\}$ 。  $z_{i,j}=1$ 表示从节点  $i$  发送至节点  $j$  的数据成功到达,  $z_{i,j}=0$  则表示从节点  $i$  发送至节点  $j$  的数据丢失,链路  $i$  的丢包率用  $\alpha_i$  表示,通过率  $\alpha_i = 1 - \alpha_i$ 。如果每个节点每轮都发送数据报文,那么在聚合节点就能够得到本轮网络中内部节点的数据报文成功到达聚合节点的情况。  $x_k^{(m)}$  表示在第  $m$  轮节点  $k$  的数据到达  $S$  节点的情况,  $x_k^{(m)}=1$  表示第  $m$  轮节点  $k$  传输至  $S$  节点的数据成功到达,  $x_k^{(m)}=0$  表示第  $m$  轮节点  $k$  传输至  $S$  节点数据丢失。在数据收集过程中,哪些节点的数据成功传输至  $S$  节点用向量  $X^{(m)}=(x_k^{(m)}, k \in V)$  表示。经过  $n$  轮数据收集后,  $S$  节点就会具有每个节点的数据到达与否的信息,记为  $X_k = \{x_k^{(m)}, 1 \leq m \leq n\}$ 。用  $n_i$  表示节点  $i$  成功传输至  $S$  节点的报文总数,  $n_{i,j}$  表示节点  $i$  成功传输至  $j$  节点的数据报文个数。由无线传感器网络的特性可知,如果  $z_{i,j}=0$ , 就有  $\forall k \in g(i), z_{k,j}=0$ , 如果  $\exists k \in g(i)$ , 使得  $z_{k,j}=0$ , 就有  $z_{i,j}=1$ 。由链路报文丢失的关联性并根据在  $S$  节点统计出的下层节点报文顺利传输到聚合节点的个数,运用统计学理论方法进行分析推测,就能够得到传感器网络内部链路的报文丢失情况。

## 3 统计推断算法

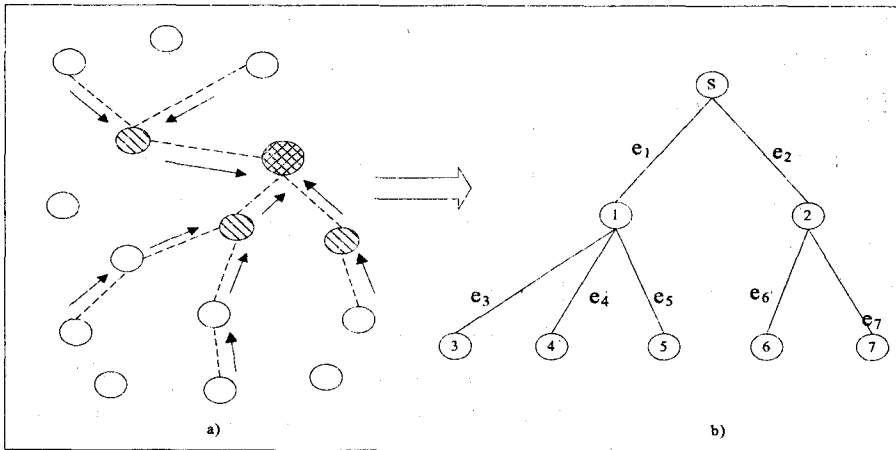
通过非完全数据推断内部链路级丢包率一般使用极大似然估计(MLE)<sup>[10]</sup>,文中使用EM算法<sup>[11]</sup>来有效解决极大似然估计问题,并在此基础上引入修正因子 $\mu$ 加以改进。

EM算法:

假设每条链路报文丢失率  $\alpha$  已知,用  $P_a$  表示每次测量结果  $X^m$  ( $1 < m < n$ ) 发生的概率。假设在点  $S$  共采集

了  $n$  轮有效数据,用  $n(x)$  表示在测量结果中  $x$  的出现次数,  $n$  次测量结果为  $x^1, x^2, x^3, \dots, x^n$  的极大似然估计的似然函数,可表示如下:

$$L(X; \alpha) = p(x^1, x^2, x^3, \dots, x^n; \alpha) =$$



a) 无线传感网络数据聚合 b) 逆向聚合树

图1 无线传感网络逻辑拓扑抽象  
余内部节点都抽象为1和2节点。另外,无线传感器网络的网络拓扑具有时变性,会根据网络节点的能量或

$$\prod_{m=1}^n p(x^m; \alpha) = \prod_{x \in \Omega} p(x; \alpha)^{n(x)} = \prod_{j \in \{1, \dots, N\}} \hat{\alpha}_j^{n_{j, \Omega}} \alpha_j^{n - n_{j, \Omega}} \quad (1)$$

将式(1)转化成对数形式

$$L(X; \alpha) = \ln p(X; \alpha) = \sum_{j \in \{1, \dots, N\}} [n_{j, \Omega} \ln \hat{\alpha}_j + n \ln \alpha_j - n_{j, \Omega} \ln \alpha_j] \quad (2)$$

其中,  $\Omega$  表示测量值  $x^1, x^2, x^3, \dots, x^n$  需要推测的性能。要使样本观测值出现的可能性最大, 即使似然函数  $L(X; \alpha)$  达到最大值,  $\alpha$  需满足

$$\frac{dL}{d\alpha} = 0 \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可求得极大似然估计为

$$\hat{\alpha}_j = \frac{n - n_{j, \Omega}}{n} \quad (4)$$

其中  $n_{j, \Omega}$  是在测量中无法直接得到的内部数据, 对其进行估计

$$\hat{n}_{j, \Omega} = n_j + (n - n_j) \frac{\alpha_{j, \Omega} - 1}{\alpha_{j, \Omega}} \quad (5)$$

EM 采用完全的对数似然函数  $L(X; \alpha)$ , 使用迭代算法逼近估计值 ( $\hat{\alpha}$ ), 具体步骤如下所示:

- (1) 设置网络链路丢包率赋初值  $\hat{\alpha}^{(0)}$ 。
- (2) 由式(5)估计无线传感器网络内部的数据
- (3) 在已知  $\hat{\alpha}^{(i)}$  的基础上, 把估计值代入式(5)计算  $\hat{\alpha}^{(i+1)}$ 。
- (4) 迭代执行上述两个步骤, 直到估计值  $\hat{\alpha}$  趋于稳定。

在上述过程中发现, EM 算法迭代到一定次数之后, 迭代所产生的丢包率估计值会呈锯齿状分布, 为了降低丢包率估计值锯齿抖动的范围, 加快收敛速率, 提高精确度, 文中提出用修正因子  $\mu$  来控制估计值的修正比例, 这样就可以在迭代过程中不断提高估计值的准确度, 使测量结果更加逼近真实值。

EM 算法步骤(3)中的  $\hat{\alpha}^{(i+1)}$  就可表示为:

$$\alpha^{(i+1)} = (1 - \mu) \alpha^{(i)} + \mu \arg \max_{\alpha} \prod_{x \in \Omega} p(x; \alpha)^{n(x)} \quad (6)$$

修正因子  $\mu$  是动态变化的, 在迭代初期, 为了更好地加快收敛速率, 修正因子一般较大。随着迭代过程的逐步进行, 修正因子逐渐变小。即修正因子与估计偏差、迭代次数均是负相关, 估计偏差越大修正因子越小, 迭代次数越多修正因子越小。

## 4 仿真结果

使用网络仿真工具 NS2 (Network Simulator 2)<sup>[12]</sup> 进行上述仿真实验, 扩展 NS2 功能, 使其能够满足无线传感器网络中数据聚合算法的仿真要求。在数据的收集过程中, 在所有逻辑链路上都预先设定好一个固定的丢失率, 但是节点能否成功收到子节点的聚合数

据是随机的, 随着数据收集轮次的增加, 该逻辑链路上实际报文丢包率趋近于预先设定的报文丢包率。通过实际丢包率与推测丢包率的比较来评价算法的准确性和有效性。

首先, 对图 1b) 中的传感器网络进行仿真, 假设所有正常链路中的报文丢失率为 0.1, 每次试验收集 500 轮数据, 收集完成后分别利用上述 EM 算法和  $\mu$ -EM 算法推测链路丢包率。图 2 为 9 节点无线传感网络链路丢包推测情况, 可以看出, 两个算法对推测链路报文丢包率具有较好的准确度, 且  $\mu$ -EM 算法相对更优。

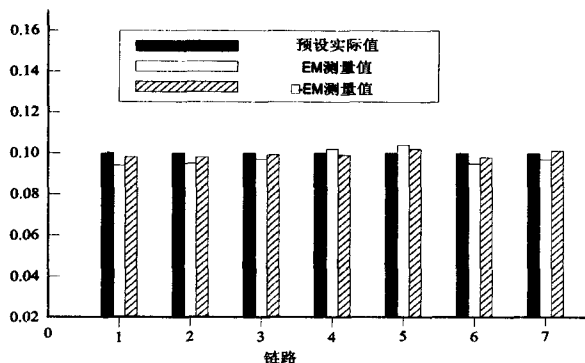


图 2 9 节点无线传感器网络链路报文丢包推测情况

对含有 200 个节点的传感器网络进行链路丢包率的仿真, 传感器网络的拓扑结构由 GT-ITM 拓扑生成软件随机性产生, 一轮仿真收集 500 次数据, 分别利用 EM 算法和  $\mu$ -EM 进行统计推测, 得出结果如表 1 所示, 可以看出, 实际值与推测值误差也较小, 说明两种算法具有较好的延伸性, 随着网络规模的增加, 虽然误差增大, 但仍可以较为准确地反映网络内部链路的性能。而且在大规模网络中,  $\mu$ -EM 算法在平均误差、最大误差两个方面相对 EM 算法都较小, 说明在精度方面  $\mu$ -EM 算法要明显优于 EM 算法。

表 1 200 节点网络仿真试验结果

$\mu$ -EM	平均误差	0.0075
	最大误差	0.0174
EM	平均误差	0.0121
	最大误差	0.0251

## 5 结束语

网络链路丢包率是反映网络性能的主要指标, 网络链路丢包率的推测对有效定位对传感器网络的易丢失链路有重要意义。文中将链路报文丢失率推测问题形式化为 MLE 问题的基础上, 用引入修正因子  $\mu$  的 EM 算法来推测链路报文丢失率, 仿真证明  $\mu$ -EM 算法相对 EM 算法更加有效和优越。随着网络规模的扩大,  $\mu$ -EM 算法虽然比 EM 算法的误差更小, 但准确率

(下转第 70 页)

仿真结果如图 6 所示。

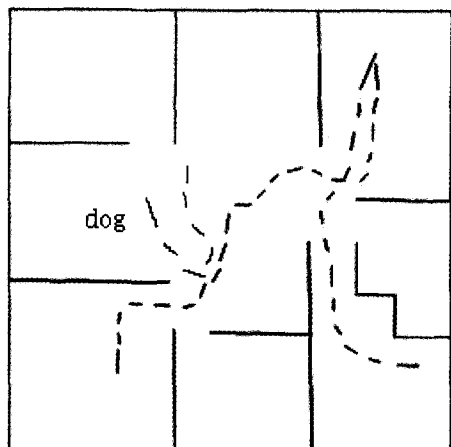


图 6 家居环境路径规划仿真图

图 6 中黑线表示机器人的运动轨迹,短黑线表示宠物狗的运动轨迹。观图可说明机器人在运动过程中可有效避开突然靠近的物体。

## 5 结束语

机器人路径规划问题的研究已经持续多年,并且可以预见在以后相当长的一段时间里研究工作将越来越深入,实际需求也越来越大。每种方法在实际应用中都会碰到很多问题。文中提出的运用栅格法与势场法相结合的方法,可扬长避短,特别对处理局部运动物体比较实用有效,很适合家居这种环境,但是对于势场法中容易产生极小值问题、在狭窄通道中容易摆动等问题还需进一步完善<sup>[12]</sup>。

## 参考文献:

- [1] 刘华军,杨静宇. 移动机器人运动规划研究综述[J]. 中国工程科学,2006(1):85-94.
- [2] 刘一松,魏 宁,孙亚民. 基于栅格法的虚拟人快速路径规划[J]. 计算机工程与设计,2008(3):1229-1230.
- [3] 王卫红,顾国民. 基于栅格法的矢量路径规划算法[J]. 计算机应用研究,2006(3):57-59.
- [4] 王醒策,张汝波. 基于势场栅格法的机器人全局路径规划[J]. 哈尔滨工程大学学报,2003(4):170-174.
- [5] Barraquand J. Monte-Carlo algorithm for path planning with many degrees of freedom[C]//Proc of IEEE Int Conf on Digital Object Identifier. [s. l.]:[s. n.],1990.
- [6] 张建英,刘 瞰. 基于人工势场法的移动机器人最优路径规划[J]. 航空学报,2007(8):1723-1728.
- [7] 梁文君. 机器人动态路径规划与协作路径规划研究[D]. 杭州:浙江大学,2010.
- [8] 纪 迪. 人工势场法在机器人避障路径规划中的应用[J]. 软件导刊,2010(7):83-85.
- [9] 黄炳强,曹广益. 基于人工势场法的移动机器人路径规划研究[J]. 计算机工程与应用,2006(27):26-28.
- [10] Kim Jin-oh, Khosla P. Real-time obstacle avoidance using harmonic potential function[C]//IEEE Conf on Digital Object Identifier. [s. l.]:[s. n.],1991:790-796.
- [11] Kitamura Y. 3-D path planning in a dynamic environment using an octree and an artificial potential field[C]//IEEE Conf on Digital Object Identifier. [s. l.]:[s. n.],1995:474-481.
- [12] Ahmad A M. Solving the narrow corridor problem in potential field-guided autonomous robots[C]//IEEE Conf on Digital Object Identifier. [s. l.]:[s. n.],2005:2909-2914.

(上接第 66 页)

有所降低,如何更加有效地推测链路丢包率是今后主要工作。另外,在推测过程中假设网络拓扑不发生变化,但在实际应用中,传感器网络的网络拓扑具有时变特性,考虑到网络拓扑的变化因素,怎样建立一个更加符合实际的基于网络拓扑时变的测量模型也是一个重要研究方向。

## 参考文献:

- [1] 李贵山,蔡皖东. 网络断层扫描技术的研究与发展[J]. 测控技术,2008,27(2):1-3.
- [2] 曾迎之,苏金树,夏 艳. 无线传感网安全数据聚合研究[J]. 计算机工程与设计,2008,21(2):23-25.
- [3] Coates M, Hero A, Nowak R, et al. Internet tomography[J]. IEEE Signal Processing Magazine,2002,19(3):47-65.
- [4] 赵 涛,蔡皖东,李勇军. 基于网络断层扫描的传感器网络测量技术[J]. 计算机工程,2008,34(6):13-15.
- [5] Tsang Y, Coates M, Nowak R D. Networks delay tomography[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2003,51(8):

2125-2136.

- [6] 宁宜杰,赵 海,尹震宇,等. WSN 中的一种多传感器数据融合算法[J]. 小型微型计算机系统,2009(8):52-54.
- [7] 李志宇,史浩山. 基于最小 Steiner 树的无线传感器网络数据融合法[J]. 西北工业大学学报,2009,27(4):558-564.
- [8] 刘林峰,刘 业. 基于热点区域场景的无线传感器网络混合式拓扑控制算法研究[J]. 计算机技术与发展,2010,20(10):8-11.
- [9] 钱 峰,胡光岷. 网络层析成像研究综述[J]. 计算机科学,2006,33(9):12-17.
- [10] 赵 佐,蔡皖东. 基于简单网络断层扫描的失效链路定位研究[J]. 计算机科学,2010,37(1):108-111.
- [11] 王爱平,张功营,刘 方. EM 算法研究与应用[J]. 计算机应用与发展,2009,19(9):108-110.
- [12] Zhao Yonggang, Govindan R, Estrin D. Residual Energy Scan for Monitoring Sensor Networks[C]//Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Florida, USA: [s. n.],2002.