

## Research on Evaluation Method for Network Layer QoS in Wireless Sensor Networks \*

LONG Yin, WU Yinfeng, WANG Xiao, FENG Renjian, WAN Jiangwen \*

(School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** A quantitative evaluation algorithm for network layer QoS in wireless sensor networks (WSNs) was proposed. The original information was collected reliably and efficiently by testbed, the evaluation index such as packet loss rate, success rate of communication, throughput and energy efficiency were evaluated quantitatively by comparing the information of testbed and sink node, a evaluation method of routing robustness based on two-dimensional cloud model was introduced. Experiment results show the evaluation method is credible and efficient, and proves its universality and scalability.

**Key words:** wireless sensor networks; network layer; QoS; quantitative evaluation

EEACC: 6150P

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2010.12.020

## 无线传感器网络的网络层服务质量的评价方法研究 \*

龙吟, 吴银锋, 王霄, 冯仁剑, 万江文 \*

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 提出了一种无线传感器网络的网络层服务质量的量化评价算法。该算法利用测试床对网络原始信息进行高效可靠的获取, 通过统计对比测试床信息和汇聚节点信息, 实现对丢包率、通信成功率、吞吐量和能量效率等指标的量化评价; 根据丢包率和通信成功率建立二维云模型, 实现对路由鲁棒性的量化评价。实验结果表明该评价算法可信有效, 并且具有较好的易用性和可扩展性。

**关键词:** 无线传感器网络; 网络层; 服务质量; 量化评价

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)12-1766-06

无线传感器网络的服务质量反映网络运行状况的优劣。无线传感器网络具有节点数量大, 节点资源能量受限的特点, 评估计算机互联网和通信网服务质量的方法无法适用于无线传感器网络, 因此, 需要研究新方法来评价无线传感器网络的服务质量。

目前, 模拟是研究评价无线传感器网络服务质量的重要手段, 但是现有的无线传感器网络模拟工具, 如 NS-2<sup>[1]</sup>、GloMoSim<sup>[2]</sup>、TOSSIM<sup>[3]</sup>、OPNET<sup>[4]</sup>、SensorSim<sup>[5]</sup>、OMNeT++<sup>[6]</sup>、SENSE<sup>[7]</sup> 等通常都对传感、信道、拓扑等参数或模型做了诸多简化和假设, 对无线传感器网络服务质量的评价带来理论误差, 难以真实体现无线传感器网络服务质量。基于测试系统技术的无线传感器网络服务质量评价能够避免模型简化带来的理论误差, 根据网络实测数据进行服务质量的评价, 使评价结果真实可信。哈佛

大学的 MoteLab<sup>[8]</sup>、俄亥俄州立大学的 Kansei<sup>[9]</sup> 等报道了其对无线传感器网络测试系统技术的研究进展。他们的测试系统实现了对无线传感器网络运行参数的实时捕获, 以及对无线传感器网络的部分服务质量指标的量化评价。但是上述测试系统没有从网络分层模型的角度对无线传感器网络服务质量进行评价指标的划分和测量, 难以分析网络各层服务质量对于无线传感器网络整体服务质量的影响以及网络各层服务质量之间的影响。而实际上, 服务质量的各个评价指标之间有一定的相关性, 例如, 路由鲁棒性虽然无法直接测量, 但和丢包率、通信成功率等指标关系密切。

针对上述问题, 需要研究一种新的基于测试系统技术的无线传感器网络服务质量的评价算法, 从网络分层模型的角度, 对无线传感器网络服务质量进行评

**项目来源:** 国家高技术研究发展计划(863 计划)专项课题资助(2009AA01Z201); 国家自然科学基金资助项目(60974121); 北京市自然科学基金资助项目(8102025)

收稿日期: 2010-05-24

修改日期: 2010-06-28

价指标的划分和测量,并且考虑各个评价指标之间的相关性。鉴于无线传感器网络服务质量的多样性和复杂性,按照网络分层模型,这里仅对无线传感器网络的网络层服务质量进行量化评价,该方法同样适用于评价其余层服务质量,具有较好的可扩展性。

### 1 测试系统描述

如图 1 所示,无线传感器网络的测试系统由 PC 端、测试床和传感器节点组成。多个传感器节点组成无线传感器网络,通过无线方式将数据包发送至汇聚节点(Sink 节点),Sink 节点再通过串口方式将数据包发送至 PC 端;同时,传感器节点又通过有线方式将数据包发送至测试床,测试床通过以太网方式转发给 PC 端;PC 端通过对测试数据的测试处理,实现对无线传感器网络的网络层服务质量的评价。

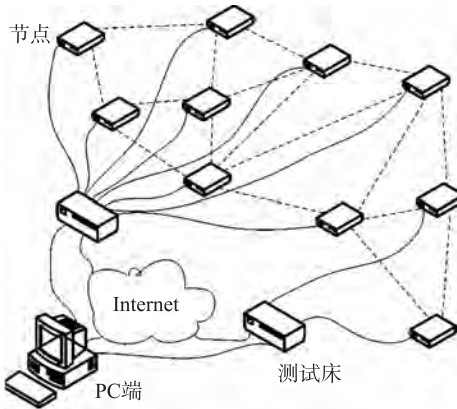


图 1 无线传感器网络测试系统

PC 端的用户应用程序接口如图 2 所示,支持 Web 访问方式,用于对测试数据的存储、分析和显示。其具体功能包括:注册功能,注册节点及测试床的 ID,确保实验数据的安全可靠;服务质量计算功能,根据原始采集信息及其相关算法,计算出服务质量的各个指标;实时显示功能,实时显示节点的信息,包括电源通断信息、能耗信息、路由信息、传感器信息、状态信息等;历史查询功能,查询测试床上传的节点历史信息;数据导出功能,将查询到的数据信息导出到本地计算机上。

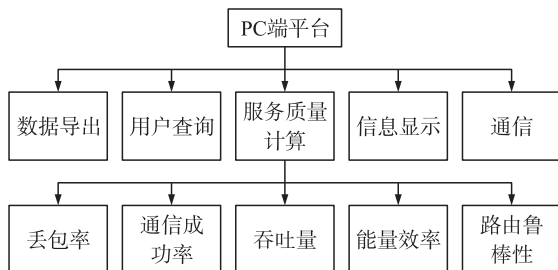


图 2 PC 端软件结构图

### 2 评价指标的分类及说明

目前,国内外关于无线传感器网络服务质量的评价指标体系尚未形成标准化和系统化<sup>[10-12]</sup>,本文总结了无线传感器网络网络层服务质量的各项评价指标及相互关系,如图 3 所示。

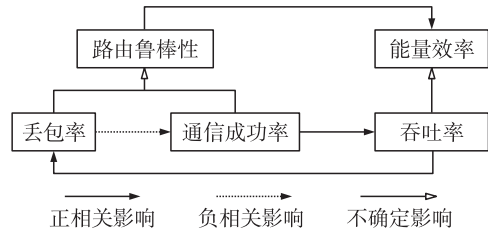


图 3 无线传感器网络的网络层服务质量指标的分类及映射关系

**定义 1 丢包率** 用于衡量无线传感器网络的数据传输可靠性,与节点电量、信道质量、吞吐量以及环境因素有关。按照测量范围,丢包率分为节点丢包率和网络丢包率:①节点丢包率定义为在一个测量周期内,网络中其余节点发往该节点的数据包数量和该节点实际接收的数据包数量的差值与网络中其余节点发往该节点的数据包数量的比值。②网络丢包率定义为在一个测量周期内,所有源节点发送的数据包数量和网络中所有目的节点实际接收的数据包数量的差值与所有源节点发送的数据包数量的比值。

**定义 2 通信成功率** 定义为网络中所有源节点向 Sink 节点发送一定数量的数据包,Sink 节点成功收到的数据包的总和与源节点发送的数据包的总和的比值。

**定义 3 吞吐量** 用于衡量无线传感器网络的数据传输能力,与无线传感器网络的协议栈以及环境因素有关。吞吐量分为节点吞吐量和网络吞吐量:①节点吞吐量定义为在一个测量周期内,节点产生、转发和接收的数据包总量;②网络吞吐量定义为在一个测量周期内,所有节点吞吐量的总和。

**定义 4 能量效率** 用于衡量无线传感器网络节点之间传输数据包的能耗,与无线传感器网络的协议栈以及环境因素有关。能量效率定义为所有源到目的节点对中,传送一个数据包的平均能耗。

**定义 5 路由鲁棒性** 用于衡量无线传感器网络在外界环境因素的扰动下仍然能够保持系统原有性能的能力,主要与无线传感器网络的路由协议有关。

上述各个评价指标并非彼此孤立,而是存在相互制约的关系。制约关系分为正相关影响,负相关影响和不确定影响,已如图 3 所示。

### 3 评价指标的量化评价算法

假定无线传感器网络由  $n$  个节点组成,每个节点分别用  $N_i (i=1,2,\dots,n)$  表示。所有节点实现无线组网的同时都通过有线方式连接到测试床。规定测量周期为  $T$ 。

#### 3.1 丢包率

节点丢包率的评价算法 节点  $N_i$  的丢包率表示为  $P_{N_i}$ 。从节点  $N_1, \dots, N_{i-1}, N_{i+1}, \dots, N_n$  中,随机抽取若干样本节点,组成发送节点集  $S$ ,  $S$  中的节点分别以速率  $v$  向被测节点  $N_i$  发送数据包。节点  $N_i$  通过有线方式将数据包转发至测试床,测试床统计包数量记为  $N_r$ 。发送节点集  $S$  也通过有线方式将数据包转发至测试床,测试床统计包数量记为  $N_s$ 。实验持续  $m$  个测量周期  $T$ ,则节点丢包率计算公式如下:

$$N_s = \frac{\sum_{j=1}^m N_{sj}}{m}, N_r = \frac{\sum_{j=1}^m N_{rj}}{m} \quad P_{N_i} = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (1)$$

通过对所有节点的节点丢包率取平均,可以得到网络中的节点平均丢包率,用  $P_A$  表示:

$$P_A = \frac{\sum_{i=1}^n P_{N_i}}{n} \quad (2)$$

网络丢包率的评价算法 用  $P_T$  表示网络丢包率,在一个  $T$  内,  $P_T$  维持在一个恒定值。假设源节点数目为  $a$ ,目的节点数目为  $b$ 。统计  $T$  内网络中所有源节点发送的数据包总数  $N_{ST}$  和网络中所有目的节点接收到的数据包总数  $N_{RT}$ ,实验持续  $m$  个测量周期  $T$ ,则网络丢包率  $P_T$  的计算公式如下:

$$N_{ST} = \sum_{i=1}^a N_{Si}, N_{RT} = \sum_{i=1}^b N_{Ri} \quad \overline{N_{ST}} = \frac{\sum_{j=1}^m N_{STj}}{m},$$

$$\overline{N_{RT}} = \frac{\sum_{j=1}^m N_{RTj}}{m} \quad P_T = \frac{\overline{N_{ST}} - \overline{N_{RT}}}{\overline{N_{ST}}} \quad (3)$$

#### 3.2 通信成功率

用  $P_{suc}$  来表示通信成功率,通过有线方式,统计网络中所有的源节点发送的数据包数量,记为  $N_s$ 。同样,通过有线方式,统计 Sink 节点收到的数据包数量,记为  $N_r$ 。在  $T$  内,  $P_{suc}$  维持在一个恒定值,实验持续  $m$  个测量周期  $T$ ,则  $P_{suc}$  表示为:

$$N_{ST} = \sum_{i=1}^{n-1} N_{Si}, N_{RT} = N_{Sink} \quad \overline{N_{ST}} = \frac{\sum_{j=1}^m N_{STj}}{m},$$

$$\overline{N_{RT}} = \frac{\sum_{j=1}^m N_{RTj}}{m} \quad P_{suc} = \frac{\overline{N_{RT}}}{\overline{N_{ST}}} \times 100\% \quad (4)$$

#### 3.3 吞吐量

用  $THR_i (i=1,2,\dots,n)$  来表示节点  $N_i (i=1,2,\dots,n)$  的吞吐量,  $THR_i$  表示网络吞吐量。节点将接收、转发和发送的数据包,通过有线方式上传至测试床,统计出  $T$  内节点  $N_i$  的吞吐量。将所有节点的吞吐量相加,得到  $THR_i$ 。由于节点在短时间内收到的包数量随时间不同抖动较大,故采用指数加权位移平均算法,将历史信息引入最终的测量结果。计算公式如下,其中  $\alpha \in (0,1]$ ,表示加权因子。

$$THR_i = \sum N_{si}(T_{n-1}, T_n) + \sum N_{ri}(T_{n-1}, T_n) + \sum N_{ti}(T_{n-1}, T_n) \quad THR_i = \alpha \cdot THR_i + (1 - \alpha) \cdot THR_i \quad (5)$$

$$THR_T = \sum_{i=1}^n THR_i \quad (6)$$

#### 3.4 能量效率

用  $E_e$  来描述能量效率,单位为  $J/\text{packet}$ 。用  $E_{N_i}$  表示节点  $N_i$  的能耗,  $U_{N_i}$  代表节点  $N_i$  的电压,  $I_{N_i}$  代表节点  $N_i$  的电流,  $T_{N_i}$  代表节点  $N_i$  的测量时间。网络中节点通过有线方式将能耗信息上传至测试床,测试床通过统计  $T$  内所有节点上传的能耗信息,计算出总能耗,根据总能耗与网络吞吐量的比值得到  $E_e$ 。能量效率计算公式如下:

$$E_e = \frac{\sum_{i=1}^n U_{N_i} I_{N_i} T_{N_i}}{THR_T} \quad (7)$$

#### 3.5 路由鲁棒性

路由鲁棒性是一个抽象的概念,具有模糊性和随机性。文献[13]提出了一种利用云模型量化评价路由鲁棒性的算法,该算法解决了路由鲁棒性量化评价的问题,但是算法是在 Matlab 环境下仿真实现的,数据来源是理想化的,存在较大的理论误差。因此,需要通过实验床测试真实无线传感器网络的运行参数,利用云模型算法计算真实环境下的无线传感器网络的路由鲁棒性指标,以避免模拟环境下的理论误差。

路由鲁棒性的评价算法:在一定的节点丢包率下的网络通信成功率大小在一定程度上反映了一个路由算法鲁棒性的高低。首先,建立并云化规则前件。选择节点平均丢包率  $P_A$  和网络通信成功率  $P_{suc}$  作为规则前件,这两个参数是可以准确测得的。然后,建立并云化规则后件。选择路由鲁棒性作为规则后件。规则前件及规则后件的等级划分如表 1

所示,对应的云模型数字特征如表 2 所示。

表 1 规则前件及规则后件的等级划分

节点丢包率( $x_1$ )	通信成功率( $x_2$ )	路由鲁棒性
A1 0~0.10	B1 0.9~1	C1 优 0.8~1
A2 0.10~0.25	B2 0.75~0.9	C2 良 0.6~0.8
A3 0.25~0.4	B3 0.6~0.75	C3 中 0.4~0.6
A4 0.4~1	B4 0~0.6	C4 差 0~0.4

表 2 规则前件及规则后件对应的云模型数字特征

	等级	Ex	En	He
节点丢包率( $x_1$ )	A1	0	0.04	0.01
	A2	0.18	0.03	0.01
	A3	0.33	0.03	0.01
	A4	0.7	0.1	0.01
通信成功率( $x_2$ )	B1	0.95	0.04	0.01
	B2	0.82	0.03	0.01
	B3	0.68	0.03	0.01
	B4	0.3	0.1	0.01
路由鲁棒性	C1	1	0.07	0.01
	C2	0.7	0.03	0.01
	C3	0.5	0.03	0.01
	C4	0.2	0.06	0.01

最后,结合专家系统建立推理规则,推理规则矩阵  $R$  如下:

$$R = \{r_{ij}\} = \begin{pmatrix} C_3 & C_4 & C_4 & C_4 \\ C_3 & C_3 & C_4 & C_4 \\ C_2 & C_2 & C_3 & C_4 \\ C_1 & C_1 & C_2 & C_3 \end{pmatrix}$$

其中, $C_i$  表示在规则前件  $A_i$  和  $B_j$  的作用下,输出的路由鲁棒性等级。比如  $r_{23} = C_4$  代表的规则为,在丢包率为 A2,通信成功率为 B3 的条件下,路由鲁棒性为 C4。

### 4 实验分析

在普通大楼内实验室环境下部署 32 个节点,定时采集室内环境信息并向监控终端汇报。节点集成 Atmega128 处理器、CC2420 无线射频收发器以及相应传感器;节点上运行 TinyOS2.0 操作系统;4 个测试床对节点提供在线编程服务、供电控制服务以及实时能耗监测服务;监控终端收集并显示节点上报数据,通过相应测试命令对网络层服务质量进行综合量化评价。实验设置测量周期为 20 min,数据包大小为 39 字节,节点发包速率为 1packet/6s。无线传感器网络的测试系统如图 4 所示。



图 4 无线传感器网络的测试系统

Active Message Protocol (AM) 是伯克利实验室实现的 Many-to-one 可靠路由协议,适用于数据收集型传感器网络。它建立一个以 Sink 为根节点的星型拓扑,每个节点将自己的数据经由单跳方式传送至 Sink 节点。

Tymo Protocol 是 IETF 国际性互联网标准化组织提出的基于 TinyOS 的多跳路由协议。此协议主要针对具有点对点、自组织、大规模特性的网络进行设计的。

根据前述网络层服务质量评价算法,采用自主研发的无线传感器网络实验床(包括传感器节点、测试床和 PC 端)分别对 AM 协议和 Tymo 协议进行量化评价,由实验结果分析这二种路由协议对网络层服务质量的影响。

(1) 丢包率测试 根据前述丢包率测试算法,分别对基于 AM 路由协议和 Tymo 路由协议的无线传感器网络进行测量,根据公式(1)得到节点丢包率如表 3、表 4 所示。根据公式(2)得到网络的节点平均丢包率:AM 路由协议为 24%,Tymo 路由协议为 28%。

表 3 基于 AM 的节点丢包率信息

测试床 ID	节点 ID	节点状态	节点丢包率
230	01	通信	18.5%
230	02	关闭	100%
230	03	通信	21.6%
230	04	通信	14.2%
230	05	通信	26.5%
230	06	关闭	100%
230	07	通信	37.5%
230	08	通信	22.5%

表 4 基于 Tymo 的节点丢包率信息

测试床 ID	节点 ID	节点状态	节点丢包率
230	01	通信	19.6%
230	02	关闭	100%
230	03	通信	21.4%
230	04	通信	16.2%
230	05	通信	30.5%
230	06	关闭	100%
230	07	通信	41.2%
230	08	通信	27.5%

(2)通信成功率测试 通过统计 Sink 节点接收数据包的数量和网络中所有发往 Sink 节点的数据包的数量,根据公式(4)得到测量周期内网络通信成功率:AM 路由协议为 76%,Tymo 路由协议为 81%。

(3)吞吐量测量 通过统计测量周期内,节点产生、转发和接收数据包的总量,得到节点吞吐量如表 5 所示。根据公式(6)得到测量周期内网络的吞吐量为:6 816 packet。

表 5 基于 Tymo 的节点吞吐量信息

测试床 ID	节点 ID	节点状态	节点吞吐量
230	01	通信	160
230	02	关闭	0
230	03	通信	148
230	04	通信	182
230	05	通信	156
230	06	关闭	0
230	07	通信	140
230	08	通信	154

(4)能量效率测量 节点供电电压恒为 3.3V,节点电流测量如表 6 所示。根据公式(7),计算网络所有节点的能耗为:3115.2J。根据能量效率的定义,令能耗除以测量周期内的网络吞吐量,得到能量效率为:0.45J/packet。

表 6 基于 Tymo 的节点能耗信息

测试床 ID	节点 ID	节点状态	电流( $\mu\text{A}$ )
230	01	通信	26 070
230	02	关闭	320
230	03	通信	32 350
230	04	通信	50 760
230	05	通信	24 530
230	06	关闭	440
230	07	通信	27 640
230	08	通信	34 560

(5)路由鲁棒性测试 根据 AM 和 Tymo 路由协议下的节点平均丢包率和网络通信成功率,计算出网络的路由鲁棒性如表 7 所示。其中 AM 路由协议的鲁棒性为 0.51,属于鲁棒性中。Tymo 路由协议的鲁棒性为 0.72,属于鲁棒性良。通过云模型得到的结论和实际应用相吻合。

表 7 路由鲁棒性测试信息

协议	节点平均丢包率	通信成功率	鲁棒性
AM	24%	76%	0.51
Tymo	28%	81%	0.72

## 5 结束语

基于无线传感器网络测试系统技术的网络层服务质量的评价算法,从网络分层模型角度实现对丢包率、通信成功率、吞吐量、能量效率和路由鲁棒性指标的量化评价,可以避免采用仿真方法带来的理论误差,并且能够兼顾各个指标之间的相关性。实验证明,该评价算法可信有效,具有较好的易用性和可扩展性。

### 参考文献:

- [1] NS-2 网络模拟基础与应用[M]. 国防工业出版社,2008.
- [2] 高振国,赵蕴龙,李香,等. GloMoSim 无线网络仿真器剖析[J]. 系统仿真学报,2006,18(suppl.2):672-675.
- [3] Philip Levis, Nelson Lee, Matt Welsh, et al. TOSSIM: Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications[C]//Proceedings of SenSys'03, First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, November, 2003: 126-137.
- [4] 陈敏. OPENT 网络仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [5] Sung Park, Andreas Savvides, Mani B. Srivastava. SensorSim: A Simulation Framework for Sensor Networks[C]//Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, Aug, 2000: 104-111.
- [6] Andras Varga, Rudolf Hornig. An Overview of the OMNeT++ Simulation Environment[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops, 2008: 1-10.
- [7] Advances in Pervasive Computing and Networking[M]. B. Szysmanski and B. Yener, Springer, 2004.
- [8] Werner-Allen G, Swieskowski P, Welsh M. Motelab: A Wireless Sensor Network Testbed[C]//IPSN 05. Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 15 April, 2005: 483-488.
- [9] Emre E, Anish A, Rajiv R, et al. Kansei: Sensor Testbed for At-Scale Experiments[C]//IPSN'06. second International TinyOS Technology Exchange, 9-21 April, 2006: 399-406.
- [10] 文浩,林闯,任丰原,等. 无线传感器网络的 QoS 体系结构[J]. 计算机学报,2009,32(3):432-440.
- [11] Pelemban E, Lee C G, Ekici E, et al. Probabilistic QoS Guarantee in Reliability and Timeliness Domains in Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of the IEEE INFO-COM. Miami, 2005: 2646-2657.
- [12] Wang Y, Liu X, Yin J. Requirement of Quality of Service in

Wireless Sensor Network [C]//Proceedings of the International Conference on Networking, International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and

Learning Technologies. Mauritius, 2006: 116 - 120.

[13] 闫斌,周小佳,王厚军,等. 无线传感器网络路由鲁棒性研究[J]. 计算机应用研究,2009,26(6):2184 - 2186.



龙 吟(1986 - ),男,北京航空航天大学在读硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络技术,ly24381@163.com;



万江文(1963 - ),男,北京航空航天大学教授,博士生导师,主要研究方向为传感系统与仪器、传感网络与信息融合、定位与跟踪技术。