

Study on Performance Evaluation Method Based on Path and Multi-criteria Metric for Wireless Sensor Network

YUAN Lingyun¹, WANG Xingchao²

1. College of Computer Science and Information Technology, Yunnan Normal University, Kunming, China

2. Computer Center of Yunnan University, Kunming, China

e-mail: yuan_ling_yun@yahoo.com.cn, adwang2355@sina.com

Abstract: Due to non-uniform network architectures and different kinds of performance requirements in different applications, a universal method of performance evaluation for wireless sensor network is still lacking at present. The performance evaluation criteria system for wireless sensor network is defined in this paper, and a synthetic multi-criteria performance evaluation method based on criteria weight is put forward. Regarded the path as a basic performance evaluation unit, a multiple measurement criteria matrix is established to calculate a synthetic performance value of the path, in which the criteria weight can be set according to the different applications. The simulation results show that network performance of wireless sensor network can be achieved efficiently with our method, in which differences in applications can be shielded. And the method can be applied to all kinds of wireless sensor networks.

Keywords: wireless sensor network; performance evaluation system; performance evaluation model; criteria weight

基于路径和多指标向量的 WSN 性能评价方法研究

袁凌云¹, 王兴超²

1. 云南师范大学 计算机科学与技术学院, 昆明, 中国, 650092

2. 云南大学 云南省电子计算中心, 昆明, 中国, 650031

e-mail: yuan_ling_yun@yahoo.com.cn, adwang2355@sina.com

【摘要】无线传感器网络结构不统一, 且随应用不同其性能要求差异大, 目前尚缺乏通用的性能评价方法。本文建立了无线传感器网络性能评价指标体系, 并提出了基于指标权重的多指标向量综合性性能评价模型。以路径为基本评价要素, 建立多指标向量矩阵, 并根据应用领域特征设定各指标的指标权重, 以计算各路径的综合性性能指标值, 从而实现全网性能的测定。仿真结果表明, 该方法能有效获取无线传感器网络综合性性能, 且不受其应用领域的限制, 可广泛应用于各类无线传感器网络性能评价。

【关键字】无线传感器网络; 性能评价体系; 性能评价模型; 指标权重

1 引言

无线传感器网络技术 (Wireless Sensor Network, WSN) 作为一种便捷、高效的数据采集和处理手段近几年得到了飞速发展, 更加广泛地应用于军事、农业、智能交通监控等领域。随着应用的深入, 对其性能方面也将提出更高的要求。无线传感器网络的可靠性、稳定性、高效性等诸多性能方面的表现也越来越引起研究者的关注。如何在现有网络环境基础上提高网络性能, 如何设计出更好运行效率和更高性能的网络协

议等, 将是无线传感器网络中非常值得研究的问题。而解决这些问题的关键在于对网络性能的有效评价和分析。

就无线传感器网络性能评价而言, 目前研究甚少, 仅有的研究主要是针对具体应用领域而提出的局部性能评价方法。傅质馨等人^[1]提出了基于三角形网格的无线传感器网络监测性能评价方法, 该方法主要从失效节点对监测网络的影响出发, 从网络生命周期和网络覆盖损失率等方面对其性能进行评价。文献[2-4]应用测量和仿真方法对无线传感器网络的底层协议 IEEE 802.15.4 从信号强度 RSSI、吞吐量等方面进行了研究。Malka. N. H^[5]的博士论文从能量消耗角度为移动传感网络提出局部性能评价方法。Jamil^[6]等人提出

基金项目: 云南省自然科学基金项目(2008CD113); 云南省教育厅面上项目(08Y0136)。

Foundation Item: Natural Science Foundation of Yunnan Province of China (2008CD113); Educational Commission of Yunnan Province of China (08Y0136).

了基于无线传感器网络的远程病人监控,并针对该应用提出了相应的性能评价指标。文献[7]将传感器网络应用于入侵检测,并对 INSENS 进行了性能评价研究。Francisco^[8]等人研究了无线传感器网络传输层协议,提出了分布式传感器网络传输协议,并对该协议进行了相关性能评价。

如何对一个无线传感器网络系统进行性能评价是网络测量研究的重要内容之一。由于不同应用背景所关注的性能指标不同,以上文献大多针对具体应用提出相应的性能评价标准,目前尚没有通用的评价指标体系和有效的评价方法。本文借鉴计算机网络的性能评价方法,提出基于数学模型与测量相结合的无线传感器网络性能评价方法。首先建立了无线传感器网络性能评价指标体系,并提出了基于指标权重的多指标向量综合评价法,以路径为基本评价要素,建立多指标向量矩阵,并根据不同应用设定相应的指标权重,以计算各路径的综合性能指标值,进而实现对无线传感器网络的量化评价。

2 无线传感器网络性能评价指标体系

在传统无线网络中,使用延迟、丢包率、带宽与流量等指标便能对所测量网络进行性能评价。相对于传统网络,无线传感器网络具有能量受限、节点处理和通信能力有限等特征,决定了传统网络的评价指标并不能完全表征一个传感器网络系统的好坏。除了延迟、丢包率、带宽等,能量消耗、网络生命周期、网络覆盖度、连通度、容错度等成为评价无线传感器网络性能不可或缺的指标。

2.1 基础性能评价

无线传感器网络在不同应用环境要求完成不同功能,但仍可提取并定义不同应用共有的基础功能,如目标对象的属性值测定、感兴趣事件的检测和参数估计、目标对象的分类和识别以及目标对象的定位和跟踪等。因此,常用的基础功能评价指标包括属性估计误差、事件感知精度、定位精度和误差等。

2.2 能耗控制评价

能量有限是无线传感器网络最重要的特征之一,也是很多应用中必须首先考虑的问题。目前有大量的文献深入研究了该问题,且都将能量消耗作为评价其算法的重要标准。显然,能量消耗是无线传感器网络的一个最通用的评价指标。能量消耗的评价主要体现在节点剩余能量、节点死亡率、生命周期等具体指标上。

定义 1. 剩余能量 (Residual Energy, RE) 若网络

运行以轮计算,剩余能量 RE_i 是指每轮运行结束后节点 i 所拥有的能量多少。

定义 2. 节点死亡率 (The Death Rate of nodes) 用以衡量目前网络的状况,是否能承担网络的正常工作,若该值大于某一阈值,则表示网络已经死亡。

定义 3. 网络生命周期 (Network Lifetime) 是能耗控制中最直接的评价指标,也是衡量一个协议能量有效性的主要标准。将网络生命周期定义为在满足一定的覆盖率、连通度的情况下,死亡节点的百分比低于某一阈值的持续时间。死亡阈值通常有三种定义:

(1) 网络中第一个节点死亡的时间; (2) 网络中 50% 节点死亡的时间; (3) 网络中最后一个节点死亡的时间。

2.3 通信性能评价

通信网络中,评价其网络性能的常用指标包括吞吐量、信道容量、链路利用率、节点利用率、系统平均响应时间、包延迟时间、延迟抖动和丢包率等。随着网络对象和网络承载业务不同,评价网络通信性能的指标也有所不同。无线传感器网络的核心功能是对目标属性的实时感知,强调节点间的协同处理,其通信性能主要体现在网络延迟、丢包率和响应时间等指标上。

定义 4. 网络延迟 (Network Delay) 是指发送方产生信号 (t_s) 到接收方收到信号 (t_r) 之间所需的时间间隔。

此外,传感器网络的主要任务已经不是传统网络的传输数据,多数应用于对某一环境的监测,连通性覆盖便成为网络自组过程中的一个关键问题。其目标是保证监测区域内所有节点形成的监测范围可以满足应用需求,同时任何一个节点都可以将其感知的数据转发到基站,而不会产生网络分隔。通常用连通度、覆盖度等指标反映传感器节点对目标监测区域的覆盖情况。

定义 5. 若用一个无向图 $G=(V, E)$ 表示网络,其中 V 为节点集合, E 为边的集合。一个连通支配集定义为: 在图 $G=(V, E)$ 中, 求一个顶点集合 $Cov(N_p) \geq K$, 使得所有在 $V-D$ 中的节点都至少和 D 中的一个节点相邻, 并且由 D 导出的子图是连通的。在集合 D 中的节点称为支配点, 不在集合 D 中的节点称为被支配点。

定义 6. K -重覆盖: 当监测区域内存在 N_p 且所有的 N_p 覆盖度 $Cov(N_p) \geq K$ 时, 称监测区域被无线传感器网络 K -重覆盖, 该 K 值即为其覆盖度。(其中 N_p 为不在任何节点感知范围内的节点交点)

定义 7. 容错度 若图 $G=(V, E)$ 是 $k(n)$ 容错的, 且存在 $m(n)$, 满足 $m(n) = \Omega(k(n))$, 使得删除 $m(n)$ 个节点后, 所得覆盖率 $C_m(n)$ 满足公式

$\lim_{n \rightarrow \infty} C_m(n) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{A_m(n)}{n} \neq 1$ ，则图 $G=(V, E)$ 的容错度为 $\theta(k(n))$ 。其中 $k(n)$ 为失败节点个数。 $\Omega(k(n))$ ， $\theta(k(n))$ 满足： $f(n) = \theta(k(n)) \Leftrightarrow$ 存在常数 c_1 、 c_2 、 n_0 ，使得 $n > n_0$ 时， $c_1 k(n) \leq f(n) \leq c_2 k(n)$ 。

3 基于路径和多指标向量矩阵的性能评价模型

基于测量的网络性能评价是目前应用最为广泛的指标体系评价法。网络指标体系评价法是为了从多个角度对网络进行综合评价，用不同的指标对评估对象发展的多个方面分别予以反映，这是目前无线传感器网络所缺乏的。此外，指标体系虽能全面反映某一网络的运行状况，但缺乏不同网络之间比较的基准，不同指标之间无法统一比较，因而不能对被评价网络做时间和空间上的整体对比，这也是无线传感器网络系统性能评价所面临的一大问题。因此，本文提出基于路径和多指标向量矩阵的综合性能评价方法，将反映无线传感器网络性能的多个指标信息综合起来，根据各自的权重计算一个综合指标，以此来反映网络整体的性能状况。

对于一个自组传感器网络而言，要考察一个网络的整体或部分的性能状况必须从网络中单个节点以及连接到这个节点路径的性能状况出发。节点是其最基本的元素，节点之间通过路径连接起来，节点的性能状况可通过测量某条路径表现出来。因此本文将路径作为网络性能评价的基本单位，对某条路径进行测量获得的结果基本可以反映此条路径上各个节点的运行

$$P_{Li} = \frac{\sum_{c=1}^l w_c (\sum_j \frac{a_{c_{ij}} - a_c^s}{a_c^h - a_c^s}) + \sum_{c=1}^k w_c (\sum_j \frac{a_c^s - a_{c_{ij}}}{a_c^h - a_c^s})}{\sum_{c=1}^{k+l} w_c} \quad (c=1, \dots, l+k, i=1, \dots, m, j=1, \dots, n) \quad (2)$$

其中， P_{Li} 表示第 i 条路径性能评价指标值； l 表示正指标个数； k 表示负指标个数； w_c 表示第 c 项指标的指标权重， $a_{c_{ij}}$ 表示第 c 项指标在第 i 条路径第 j 时刻的测量值； a_c^h 表示第 c 项指标的最优值， a_c^s 表示第 c 项指标的最差值。从式 (2) 可知，对于从 A 矩阵获得的测量指标值，并不能直接作为评价指标值，采用 (2) 式对其进行修正，用 $\frac{a_{c_{ij}} - a_c^s}{a_c^h - a_c^s}$ 对正指标进行

修正， $\frac{a_c^s - a_{c_{ij}}}{a_c^h - a_c^s}$ 对负指标进行修正。依次将测量指标转换为评价指标。

对某一测量时刻 T ，传感器网络性能评价指标是分别将该网络中各路径的性能评价指标综合求值的结果，其值反映了网络整体性能。由式 (3) 计算：

状况。通过对路径上的节点的多个单项性能指标进行综合处理，得出综合性能参数值，可依据此综合性能参数值对同一路径在不同时间或同一时间不同路径之间进行性能比较分析。

定义 8. 性能评价指标值越高则表明该条路径的性能越好，相反，越低则表明该条路径的性能越差。

定义 9. 指标测量值越大，表明性能越好，则该指标称为正指标；相反，若指标值越大表明性能越差，则称其为负指标。如剩余能量值越大，表示其网络性能越好，则该指标称为正指标；网络延迟越大，表示其网络性能越差，则该指标称为负指标。

假设对于某个测量指标给定 m 个时刻的 n 条路径上的测量数据，本文用一个 $m \times n$ 矩阵 A 表示相应的测量数据。其中矩阵的每一行表示同一路径在不同时刻的指标测量值，每一列表示不同的路径在同一时刻的指标测量值。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对某一测量时刻 T ，用加权平均方法计算其路径性能评价价值，用以描述路径的性能状况，同时该值也可用于各条路径之间的比较。具体计算方法如式 (2) 所示：

$$P_N = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Li} W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3)$$

其中， P_N 为网络性能评价指标， n 为路径数， W_i 为各路径的性能指标权重。对不同路径可根据其在网络中的重要程度赋予不同的路径指标权重，以便更为合理地评价网络的综合性能状况。

4 实验验证

4.1 实验设置

本实验基于 NS-2.27 仿真平台，为了验证不同应用背景下传感器网络系统的综合性能和各性能指标权重设定对网络性能的影响，仿真中可设置不同的应用场景，如交通监控场景、生态环境监控场景等，根据

各场景对相关指标的不同要求，设定相应的 w_i 。本文以基于无线传感器网络的高速公路交通监控系统为例，应用上述方法比较同一监控区域在不同覆盖率下的网络性能，仿真网络参数设置如表 1 所示：

假定高速公路为规范的矩形区域，其中节点 0、1、2 为以不同速度运动的目标节点，节点 36、节点 86 分别为场景 1 和场景 2 的数据汇聚点。场景 1 从减少冗余角度考虑，仅按其通信距离边界布置节点，即每隔 100m 铺设一个节点，其局部覆盖度为 2。场景 2 从提高数据精确度和冗余路径角度考虑，布置了多个冗余节点，其局部覆盖度为 4。各场景的网络初始拓扑结构如图 1、图 2（场景 2 中各节点的网状网连接状况未一一列出）所示。

Table 1. The network simulation parameters
表 1. 仿真参数设置

参数	场景 1	场景 2
监控区域	1000m×100m	1000m×100m
节点数	37	87
节点初始能量	2J	2J
基站位置	(500, 150)	(500, 150)
包长度	512bytes	512bytes
能量消耗阈值	0.02J	0.02J
E_{elec}	50nJ	50nJ
E_{amp}	100pJ/bit/m ²	100pJ/bit/m ²
d	100m	100m
路由协议	AODV	AODV
目标节点	0, 1, 2	0, 1, 2
基站节点	36	86

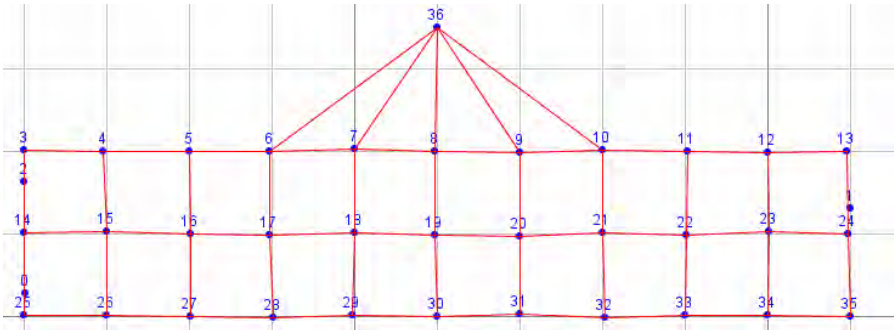


Figure 1. The topology structure for wireless sensor network in highway monitoring (37nodes)
图 1. 高速公路交通监控拓扑结构 (37nodes)

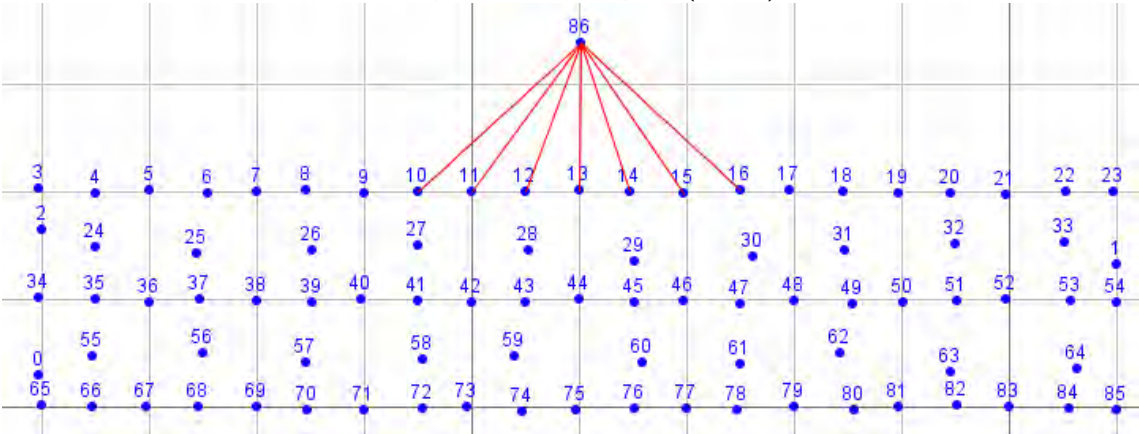


Figure 2. The topology structure for wireless sensor network in highway monitoring (87 nodes)
图 2. 高速公路交通监控拓扑结构(87nodes)

4.2 结果分析与验证

无线传感器网络路通常以按需自组织方式形成，当某节点需要向基站发送数据时，以某种路由算法形成路径，而且路径是动态更新的，本实验中路由采用 AODV 协议。依据各场景的拓扑结构，随机选取当前路径进行性能测量。测量指标的最优值

与最差值可根据测量经验或测量结果来确定，本文选取测量结果中的最高值作为最优值,最小值作为最差值。

假设所有指标权重用 (0-1) 之间的模糊数值表示，可根据相关应用背景对指标的偏重程度，设定其相应的权重。偏重程度越高，则其权重越大。如对高速公

路交通监控而言, 能量有效性、数据传输和处理的实时性是其最为关注的性能, 则可将能量消耗、网络延迟等指标的权重设置得偏大, 其它指标可相应确定; 若对环境监控而言, 网络生命周期、网络覆盖率等便成为其性能评价的重要指标, 其权重相应增大, 吞吐量、网络延迟等指标权重则相对变小。下面以一个实例描述网络性能指标的计算过程。

随机选取测量过程中某时间点的一些路径进行测试, 表 2 列出了场景 1 某次仿真结果中几项重要指标的测量值 (在计算存活节点数时, 基站节点 36 不纳入计算)。

表 3 列出了场景 2 某次仿真结果中几项重要指标的测量值:

Table 2. The measurement of network path performance in the scene1
表 2. 场景 1 网络性能实际测量值

performance in the scene1				
表 2. 场景 1 网络性能实际测量值	时间	剩余能量	存活节点数	网络延迟
路径				
35-23-33-32-21-9-36	4	8.484978	6	0.0829566
	13	3.846166	6	0.0268409
	15	2.865303	5	0.0284607
	17	2.149991	4	0.0174602
	19	1.478556	3	0.0163583
	23	0.950940	3	0.0143345
	4	7.334850	5	0.0178809
27-16-17-18-7-36	13	4.445288	5	0.0203424
	15	3.020812	4	0.0154814
	17	1.773161	3	0.0252116
	19	1.455178	3	0.0163096
	23	0.911032	3	0.0123697
	4	5.650761	4	0.0743199
	13	3.016243	4	0.0344401
24-23-11-10-36	15	2.266815	4	0.0312345
	17	1.707311	3	0.0258912
	19	1.397854	3	0.0218721
	23	0.854814	3	0.0153423
25-15-16-17-7-36	4	7.136485	5	0.0755877
	13	2.445288	4	0.0268802
	15	2.020814	3	0.0268802
	17	1.855178	3	0.0169141
	19	1.773161	3	0.0194661
	23	1.111032	3	0.0164663

若为剩余能量、存活节点数、网络延迟选取其权重指标分别为: 1、0.8、0.9, 则可通过式 (2) 计算出各条路径的性能评价指标值 P_L , 如表 4、表 5 所示:

Table 3. The measurement of network path performance in the scene 2
表 3. 场景 2 网络性能实际测量值

路径	时间	剩余能量	存活节点数	网络延迟
24-36-6-7-9-11-86	4	9.484978	6	0.8041156
	13	5.846166	6	0.1023843
	15	4.865303	6	0.1204968
	17	2.089991	5	0.0983523
	19	1.935094	4	0.1235563
	23	1.845561	4	0.0835534
	4	8.984978	6	0.2350913
85-83-81-62-29-16-86	13	6.246166	6	0.0983451
	15	5.065303	5	0.0935424
	17	4.089991	5	0.1234532
	19	2.983441	4	0.0648293
	23	1.45561	3	0.0423453
	4	5.850769	4	0.2672761
	13	4.016238	4	0.1123454
23-64-54-52-86	15	3.266819	4	0.0922344
	17	1.731344	3	0.0532093
	19	1.397856	3	0.0534322
	23	0.354814	2	0.0394523
	4	6.050761	4	0.1066395
	13	3.816243	4	0.0823453
	15	2.986815	3	0.0832304
63-49-17-15--86	17	1.717318	3	0.0639485
	19	1.397854	3	0.0528395
	23	0.924814	2	0.0342356

Table 4. The value of path performance evaluation criteria (P_L) in the scene 1
表 4. 场景 1 路径性能评价指标值

路径	时间	P_L
35-23-33-32-21-9-36	4	0.66667
	13	0.70649
	15	0.55245
	17	0.47092
	19	0.34478
	23	0.32872
	4	0.81938
27-16-17-18-7-36	13	0.66749
	15	0.52257
	17	0.31727
	19	0.34387
	23	0.37309
	4	0.36989
	13	0.43277
24-23-11-10-36	15	0.41152
	17	0.31086
	19	0.31482
	23	0.31929
	4	0.53375
	13	0.44075
25-15-16-17-7-36	15	0.32141
	17	0.36043
	19	0.34440
	23	0.32642
	4	0.32642

Table 5. The value of path performance evaluation criteria (P_L) in the scene 2

表 5. 场景 2 路径性能评价指标值

路径	时间	P_L
24-36-6-7-9-11-86	4	0.66667
	13	0.82772
	15	0.78335
	17	0.59817
	19	0.50577
85-83-81-62-29-16-86	23	0.51939
	4	0.89275
	13	0.84086
	15	0.72096
	17	0.66856
23-64-54-52-86	19	0.57857
	23	0.44855
	4	0.60353
	13	0.59612
	15	0.50042
63-49-17-15--86	17	0.45503
	19	0.44141
	23	0.33107
	4	0.68120
	13	0.60107
	15	0.49296
	17	0.44981
	19	0.44167
	23	0.35646

在分布式无线传感器网络中，每条路径都是平等的，因此其路径权重相等，这里假设都为 1，则可根据公式（3）计算出每一时间点的网络性能值 P_N ，如表 6 所示。图 3 显示了网络性能随时间变化的情况。

通过图 3 不仅可以直观地分析网络性能随时间变化的情况，且能有效比较不同网络的性能，还能体现性能指标权重选取对网络性能的影响力度。如本文针对交通环境的特征，给剩余能量设置了最大的权重，而剩余能量是随时间增长而减小的，因此其整体网络性能基本上也随时间增长呈下降趋势。此外，同一监控区域在两种不同覆盖度的网络场景下，明显覆盖度高的场景下具有更好的网络性能。

Table 6. The value of network performance evaluation (P_N)
表 6. 网络性能指标值

时间	P_N (场景 1)	P_N (场景 2)
4	0.59742	0.71038
13	0.56188	0.71644
15	0.45199	0.62442
17	0.36487	0.54289
19	0.33697	0.49186
23	0.33688	0.41387

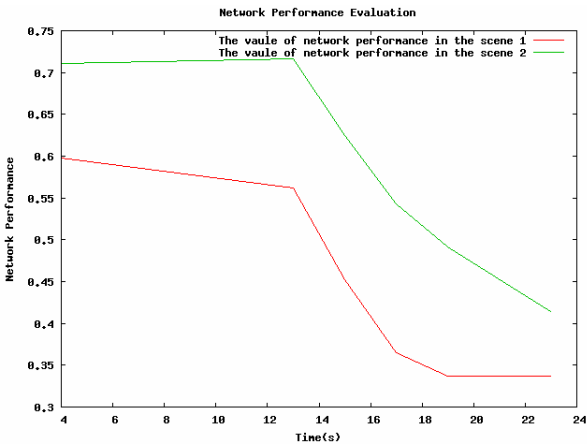


Figure 3. The network performance VS Times
图 3. 网络性能变化情况

5 结束语

本文针对无线传感器网络尚不存在一个通用、全面的网络性能评价体系，且不能综合评价网络性能的问题，提出了基于指标权重的多指标综合评价方法。该方法以路径为基本评价单元，可以综合评价路径及网络之间的性能状况。仿真实验表明，该方法能有效评价无线传感器网络性能，可应用于不同背景下的无线传感器网络性能评价，通过调节相应指标的权重，便可获得其综合性能指标值，为无线传感器网络提供了一种有效的性能评价方法，同时也为无线传感器网络性能评价的深入研究奠定一定的基础。在以后的工作中，我们将进一步完善性能评价模型，并提出更为合理和准确的指标权重模型，以提高无线传感器网络的评价效率和准确度。

References (参考文献)

- [1] Fu Zhixin, Wu Xiaobei, Huang Cheng, Xu Zhiliang. Monitoring performance criterion for triangle grid-based wireless sensor networks [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science), 2009, 33(1), 1-6.
傅质馨, 吴晓蓓, 黄成, 徐志良. 一类三角形网格无线传感器网络监测性能评价方法[J]. 南京理工大学学报 (自然科学版), 2009, 33(1), 1-6.
- [2] Wilson T. H., Woon, T. C. Wan. Performance evaluation of IEEE 802.15.4 Ad hoc wireless sensor networks: simulation approach [C]. IEEE Conference System, Man, and Cybernetics, 2006, 1443-1448.
- [3] Hock Guan Goh, Kae Hsiang Kwong, Craig Michie, Ivan Andonovic. Performance evaluation of priority packet for wireless sensor network [C]. Second International Conference on Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM '08, 2008, 494-499.
- [4] Zheng Jianliang, Myung J. Lee. A comprehensive performance study of IEEE 802.15.4. IEEE 802.15.4 Draft D18 (Draft Standard: Low Rate Wireless Personal Area Networks), 2003.
- [5] Malka Nishanthi Halgamuge. Performance evaluation and enhancement of mobile and sensor networks. The University of Melbourne, 2006.
- [6] Jamil Y. Khan, Mehmet R. Yuce, Farbood Karami. Performance

- evaluation of a wireless body area sensor network for remote patient monitoring [C]. In the conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE EMBC08), 2008.
- [7] Jing Deng, Richar Han, Shivakant Mishra. A performance evaluation of intrusion-tolerant routing in wireless sensor networks. IEEE Workshop of Information Processing in Sensor Networks (IPSN), 2003, 1-16.
 - [8] Francisco Rocha, Antonio Grilo, Paulo Rogerio Pereira. Performance evaluation of DTSN in wireless sensor networks: wireless systems and mobility in next generation internet. The 4th International Workshop of the EuroNGI/EuroFGI Network of Excellence Barcelona, Spain, 2008, 1-9.
 - [9] Wang Yang, R. Andrew Swartz, Jerome P. Lynch, et al. Performance evaluation of decentralized wireless sensing and control in civil Structures [C]. SPIE 13th Annual International symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, CA, 2006, 1-12.
 - [10] Yuichi Kiri, Masashi Sugano, Masayuki Murata. Performance evaluation of inter-cluster multi-hop communication large-scale sensor networks [C]. The 6th IEEE International Conference on Computer and Information Technology, 2006, 215-215.
 - [11] Petrova, M. Riihijarvi, J. Mahonen, P. Labella, S. Performance study of IEEE 802.15.4 using measurements and simulations [C]. Wireless Communications and Networking Conference 2006. IEEE WCNC, 2006, 1, 487-492.
 - [12] Ivanovitch M. D. Silva, Luiz Affonso Guedes. Performance evaluation of a compression algorithm for wireless sensor networks in monitoring applications [C]. ETFA, 2008, 72-678.