

基于 PEPA 模型的无线传感器网络性能分析

吴宁夏,汪宏艳,秦榛榛

(扬州大学信息工程学院,江苏 扬州 225009)

[摘要] 无线传感器网络(WSN)是由大量的微型传感器节点组成,通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织的网络系统. 无线传感器网络的性能决定着通信的质量,本文的无线传感器模型采用了 LEACH 协议,并利用一种高层次的建模机制——性能分析进程代数(PEPA)来分析网络的吞吐量、利用率和反应时间.

[关键词] 无线传感器网络,LEACH,性能评估进程代数

[中图分类号] TP212.9 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2015)02-0041-05

Performance Analysis for Wireless Sensor Network Based on PEPA

Wu Ningxia, Wang Hongyan, Qin Zhenzhen

(School of Information Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Wireless sensor network (WSN) is a multi-hop self-organizing network system through wireless communication with large numbers of sensor nodes. The performance of wireless sensor network determines the quality of communication, and this paper uses the LEACH protocol and a high-level modeling mechanism—Performance Evaluation Process Algebra (PEPA) to analyze the network throughput, utilization rate and the response time.

Key words: wireless sensor network, LEACH, PEPA

无线传感器网^[1](wireless sensor network, WSN),是一种由大量的微型传感器节点组成,通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织的网络系统,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息,并发送给观察者. 无线传感器网络广泛应用于军事国防、环境科学、交通管理、反恐维和、灾害预测、智能城市建设等领域.

传感器节点是一个很小的装置,一般包括 3 个基本部分,分别是:从物理环境数据采样的感知子系统、本地数据处理和储存的处理子系统以及数据传输的无线通信子系统. WSN 中的传感器节点通过自身携带的微型传感器实时感知外界环境参数或监测目标信息,并将所采集的数据以无线多跳转发的方式传输至汇聚节点. 汇聚节点负责收集网络中各传感器节点的数据并汇报给用户.

本文采用了 LEACH 协议的无线传感器网络的性能,例如吞吐量、利用率和反应时间,通过改善这些性能指数可以进一步优化该无线传感器网络. 采用了进程代数性能评估(PEPA)来分析性能,PEPA 具有组合化的描述技术,它可以将一个系统模型描述为一系列通过执行动作进行交互的进程的集合,此外 PEPA 不仅具备评价进程是否表现正确的技术,而且还具备评价进程是否表现适时的技术. 因此,一旦应用 PEPA 完成对所给模型的描述工作,那么自然可以得到对这个系统模型的定性分析和定量分析了.

LEACH^[2-5]协议的基本思想是:第一阶段以循环的方式随机选择簇头节点,并随机选择多个传感器节点与一个簇头节点组成区域,第二阶段每个区域内的传感器节点收集数据并融合传送给簇头节点,第三阶段各个区域的簇头节点间融合并发送数据给用户(或基站). 因此 LEACH 协议能将整个网络的能量负载平均分配到每个传感器节点中,从而达到降低网络能源消耗、提高网络整体生存时间的目的. 本文中簇头的选取不考虑(假定每轮的簇头均已选定).文献[6,7]利用 PEPA 模型对一部分系统进程建模,并对 WSN

收稿日期:2014-08-26.

基金项目:国家自然科学基金(61472343).

通讯联系人:汪宏艳,硕士研究生,研究方向:无线通信.E-mail:yzhywang@163.com

网络有一定的理解,根据文献[6]我们能够对其性能利用 PEPA 语言表示.

1 PEPA 模型简介

PEPA 详细的介绍参看文献[6,8,9]. PEPA 是 1990 年 Hillston 提出的,它是一种对低层次随机模型的高层次建模语言,并描述了系统进程动作之间的相互作用.

在 PEPA 中,并发系统可以模型化为实体的集合,这些实体被称为进程,进程之间通过执行动作进行交互和通信. 每一个动作记为 (α, r) , 其中 α 是动作类型, r 是执行动作 α 的时间延迟,并服从指数分布, r 量化了选择的不确定性,若进程 P 执行动作 (α, r) 后表现为进程 Q , 则记为 $P \stackrel{\text{def}}{=} (\alpha, r). Q$ 或者 $P \xrightarrow{(\alpha, r)} Q$.

(1) PEPA 句法结构

$(\alpha, r). P$ 动作前缀操作:系统执行动作 (α, r) 后表现为进程 P , (α, r) 的活动类型为 α , 活动时延用参数 r 表示,并且服从指数分布.

$P+Q$ 选择操作:系统或者执行进程 P 或者执行进程 Q , 这种选择是通过进程 P 和进程 Q 之间的竞争实现的,即系统表现为首先完成动作的那个进程,不防设为 P , 则 Q 就会被丢弃.

$P \triangleright_L \triangleleft Q$ 并发操作:两个进程 P 和 Q 的并发执行, L 是动作的集合, L 中的动作需要两个进程 P 和 Q 同时执行才能完成. 如果 $L = \emptyset$, 表明 P 和 Q 不需要同步任何动作, 记为 $P \parallel Q$.

P/L 隐藏操作:在集合 L 中的所有动作对于外部观察者而言是看不到的, 只有当集合 L 中的所有类型都被隐藏时系统才表现为进程 P .

$A \stackrel{\text{def}}{=} P$ 常数操作:把进程 P 赋值给常数 A , 常数 A 就表现为与进程 P 相似的行为.

(2) 语义和状态空间爆炸问题

PEPA 拥有一种结构化的操作语义,该操作语义是转移集合的规则,并定义了每个语言组合的进化规则^[8,9]. 这种正规的语义将 PEPA 映射到离散的状态空间和连续时间马尔科夫链(CTMC)^[10].

由 PEPA 可自动得到 CTMC 的无穷小生成矩阵,解出表征全局平衡方程的矩阵问题可以推导出 CTMC 的稳态概率分布,则吞吐量、利用率等性能分析得以进行. 而该矩阵可以作为瞬时分析的基础,例如响应时间的分布问题.

然而,对于大规模的模型,状态空间可能太大导致性能分析不能实现,这种问题被称为状态空间爆炸. 为了解决状态空间爆炸的问题,引入了流体逼近方法,生成一系列的常微分方程(ODEs),本文不做过多讨论,详细内容参见文献[6,8].

2 WSN 的 PEPA 模型

WSN 中,假定每一轮簇头节点均已选定(本文不考虑选择簇头的情况并已划分好区域),传感器节点感应收集数据并融合传给簇头节点,区域间的簇头节点收集融合数据给基站.

Node 子系统中初始状态 $\text{Node}_{\text{idle}}$ 执行了动作 idle_1 跳转到 $\text{Node}_{\text{sense}}$ 状态,动作速率是 r_{idle_1} ,接着从 $\text{Node}_{\text{sense}}$ 状态执行动作 sense ,跳转的状态有两种可能: $\text{Node}_{\text{send}}$ 或是 $\text{Node}_{\text{idle}}$,其跳转速率均为 r_{sense} ,若跳转到 $\text{Node}_{\text{idle}}$,则 node 子系统恢复到初始状态;若跳转到 $\text{Node}_{\text{send}}$ 状态,则其执行 send_1 动作跳转到 $\text{Node}_{\text{idle}}$ 状态,动作速率为 r_{send_1} ,node 子系统完成了一个工作循环.

该过程可以用 PEPA 语言写成如下形式:

Node model:

$\text{Node}_{\text{idle}} \stackrel{\text{def}}{=} (\text{idle}_1, r_{\text{idle}_1}). \text{Node}_{\text{sense}}$

$\text{Node}_{\text{sense}} \stackrel{\text{def}}{=} (\text{sense}, r_{\text{sense}}). \text{Node}_{\text{send}} + (\text{sense}, r_{\text{sense}}). \text{Node}_{\text{idle}}$

$\text{Node}_{\text{send}} \stackrel{\text{def}}{=} (\text{send}_1, r_{\text{send}_1}). \text{Node}_{\text{idle}}$

Cluster 子系统中初始状态 $\text{Cluster}_{\text{idle}}$ 执行了动作 idle_2 跳转到 $\text{Cluster}_{\text{receive}}$ 状态,动作速率为 r_{idle_2} ,再从 $\text{Cluster}_{\text{receive}}$ 状态执行动作 send_1 跳转到 $\text{Cluster}_{\text{send}}$ 状态,动作速率为 r_{send_1} ,接着执行动作 send_2 恢复到初始状态 $\text{Cluster}_{\text{idle}}$,动作速率为 r_{send_2} ,cluster 子系统完成一个工作循环.

该过程可以用 PEPA 语言写成如下形式:

Cluster model:

$$\text{Cluster}_{\text{idle}} \stackrel{\text{def}}{=} (\text{idle}_2, r_{\text{idle}_2}). \text{Cluster}_{\text{receive}}$$

$$\text{Cluster}_{\text{receive}} \stackrel{\text{def}}{=} (\text{send}_1, r_{\text{send}_1}). \text{Cluster}_{\text{send}}$$

$$\text{Cluster}_{\text{send}} \stackrel{\text{def}}{=} (\text{send}_2, r_{\text{send}_2}). \text{Cluster}_{\text{idle}}$$

BS 子系统中初始状态为 BS_{idle} , 执行动作 idle_3 跳转到 $\text{BS}_{\text{receive}}$ 状态, 动作速率为 r_{idle_3} , 接着执行动作 send_2 跳转到初始跳转到 BS_{idle} , 动作速率为 r_{send_2} , 则 BS 子系统中一个工作循环形成.

该过程可以用 PEPA 语言写成如下形式:

BS station model:

$$\text{BS}_{\text{idle}} \stackrel{\text{def}}{=} (\text{idle}_3, r_{\text{idle}_3}). \text{BS}_{\text{receive}}$$

$$\text{BS}_{\text{receive}} \stackrel{\text{def}}{=} (\text{send}_2, r_{\text{send}_2}). \text{BS}_{\text{idle}}$$

系统模型可以用 PEPA 语言写成如下形式:

System model:

$$(\text{Node}_{\text{idle}}[M] \triangleright \underset{\text{send}_1}{\langle \text{Cluster}_{\text{idle}}[N] \rangle}) \triangleright \underset{\text{send}_2}{\langle \text{BS}_{\text{idle}}[K] \rangle}$$

式中: send_1 和 send_2 为并发动作, 即 send_1 是由 $\text{Node}_{\text{send}}$ 和 $\text{Cluster}_{\text{receive}}$ 共同完成, send_2 是由 $\text{Cluster}_{\text{send}}$ 和 $\text{BS}_{\text{receive}}$ 共同完成. 其中 M 为 Node 子系统中 $\text{Node}_{\text{idle}}$ 的初始值, N 为 Cluster 子系统中 $\text{Cluster}_{\text{idle}}$ 的初始值, K 为 BS 子系统中 BS_{idle} 的初始值, 没有给出的状态初始值默认为 0.

3 性能分析

无线传感器网络中, 吞吐量是一个重要的性能指数, 定义为 1 个单位时间 (1 s) 内系统完成某种动作平均数目. 这里将讨论 send_2 的吞吐量, 由上文可知, send_2 为群首给基站传送数据, 分析 send_2 可知数据传输的快慢, 进一步可根据要求改进模型.

数据传输快并不代表系统的利用率就高, 利用率为一个进程维持在一个状态的概率, Cluster 子系统的状态有 3 个, 分别为 $\text{Cluster}_{\text{idle}}$ 、 $\text{Cluster}_{\text{receive}}$ 和 $\text{Cluster}_{\text{send}}$. $\text{Cluster}_{\text{receive}}$ 的利用率, 即 $\text{Cluster}_{\text{receive}}$ 的值占 Cluster 子系统的总数的比率, $\text{Cluster}_{\text{receive}}$ 利用率越高说明 $\text{Cluster}_{\text{receive}}$ 维持的概率高, 从而表明了 send_1 动作多, 节点给群首传送数据效率高.

响应时间定义为一个工作序列 ($\text{sense}, \text{send}_1, \text{send}_2$) 经历的时间, 该性能能够表明整个系统收集时间, 从而反映整个系统执行收集数据的快慢.

根据实际 WSN 物理环境, 本文对 PEPA 模型中的参数进行了设置, 见表 1 所示.

表 1 性能参数设置

Table 1 Performance parameter setting

动作	介绍	速率
idle_1	Node 子系统中节点由空闲状态转变为感应状态	1.5
idle_2	Cluster 子系统中群首由空闲状态转变为接收状态	1.5
idle_3	BS 子系统中基站由空闲状态转变为接收状态	1.5
(node) sense_1	Node 子系统中节点开始感知周围状态并收集数据, 完成动作变为发送状态	5.4
(node) sense_2	Node 子系统中节点未感应并转变为空闲状态	5.4
(node) send_1	Node 子系统中节点发送数据给群首, 完成动作变为空闲状态	27
(cluster) send_1	Cluster 子系统中群首接收来自节点的数据, 完成动作转变为发送状态	2.21
(cluster) send_2	Cluster 子系统中群首发送数据给基站, 完成动作变为空闲状态	42
(BS) send_2	BS 子系统中基站接收来自群首的数据, 完成动作后变为空闲状态	2.21

图 1 对比了 $N=20, K=1; N=40, K=1; N=60, K=1$ 三种情况, 定义 send_2 的吞吐量为 send_2 动作的平均速率, 表示 Cluster 子系统发送数据给 BS 子系统的快慢, 自变量为 node 的个数, 可以看出 N 的变化对 send_2 吞吐量影响的总趋势没有明显的改变, send_2 吞吐量值的大小与 N 的变化没有明显关系. send_2 吞吐

量随着节点个数的增加而增加并最终达到稳定. send_2 吞吐量和节点的个数有关,随着节点的增加, send_2 吞吐量不是一直增加的.

图 2 对比了 $N=40, K=1; N=50, K=1; N=60, K=1$ 三种情况,可以看出 N 的变化对 $\text{Cluster}_{\text{receive}}$ 利用率影响的总趋势没有明显的改变. $\text{Cluster}_{\text{receive}}$ 利用率随着节点个数的增加而增加并最终达到稳定. 可见, $\text{Cluster}_{\text{receive}}$ 利用率和节点的个数有关,随着节点的增加, $\text{Cluster}_{\text{receive}}$ 利用率不是一直增加的, $\text{Cluster}_{\text{receive}}$ 利用率很高,表明群首给基站传输数据成功率很高.

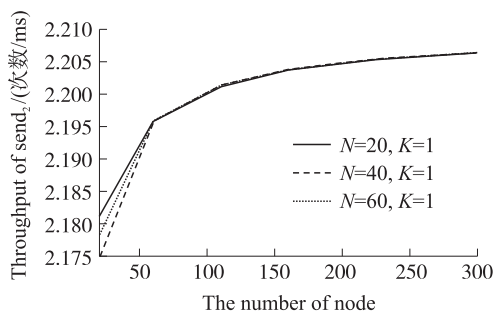


图 1 send_2 动作的吞吐量

Fig. 1 The throughput of send_2 versus the number of node

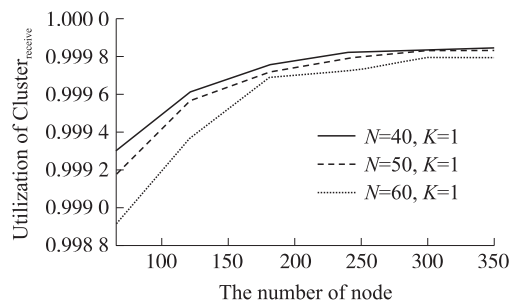


图 2 $\text{Cluster}_{\text{receive}}$ 利用率

Fig. 2 The utilization rate of $\text{Cluster}_{\text{receive}}$ versus the number of node

随着节点个数的不同,工作序列($\text{sense}, \text{send}_1, \text{send}_2$)的响应时间如图 3 所示. 响应时间随着节点个数的增加大体上成线性增加. 这里,对比了 $N=20, K=1; N=40, K=1; N=60, K=1$ 三种情况,可以看出 N 的变化对工作序列响应时间影响的总趋势没有明显的改变. 不难发现,有限的资源被用户利用,随着用户数目的增加,用户等待服务的时间也会延长.

图 4 记录了工作序列($\text{sense}, \text{send}_1, \text{send}_2$)的响应时间的累积分布函数. 由图 4 可知,大部分动作序列的响应约在 100 ms 之前就已完成,即发生在 100 ms 之前的工作序列的概率为 1. 响应时间的期望为 21.509 7 ms.

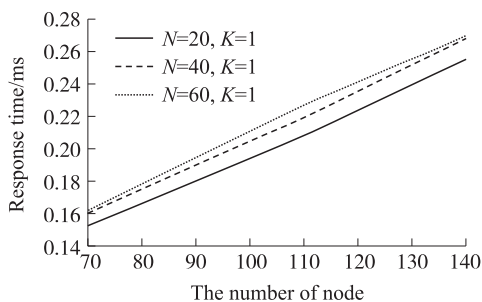


图 3 一个工作序列的响应时间

Fig. 3 The response time versus the number of node

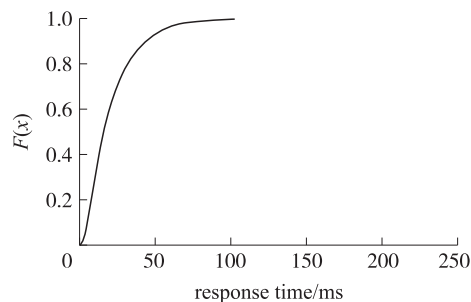


图 4 响应时间的累积分布函数

Fig. 4 The CDF of response time

4 结语

PEPA 模型有利于系统设计和系统进程之间相互作用的高层次表示,本文根据 PEPA 语义写出了 WSN 的模型,并利用进程代数进行了性能分析,分析了 WSN 中的吞吐量、利用率、响应时间. 通过实验,知道了这些性能和节点个数变化的联系,并给出了相关变化图,这对下一步的 WSN 模型的改进有很大帮助.

[参考文献] (References)

- [1] Akyildiz I F, Su Weilian, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: a survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] Rajan P, Geetha V. Energy efficient LEACH by enhancing the data update procedure of cluster head[C]//2013 Fourth Inter-

- national Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT). Tiruchengode India, 2013.
- [3] Mahmood D, Javaid N, Mahmood S, et al. MODLEACH: A variant of LEACH for WSNs [C] // 2013 Eighth International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA). Compiegne France: IEEE, 2013: 158–163.
- [4] Renold A P, Poongothai R, Parthasarathy R. Performance analysis of LEACH with gray hole attack in wireless sensor networks [C] // 2012 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI). Coimbatore India, 2012.
- [5] Kumar N, Kaur J. Improved LEACH protocol for wireless sensor networks [C] // 2011 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM). Wuhan, 2011.
- [6] Jie Ding, Jane Hillston. Structural and fluid analysis of large scale PEPA models-with applications to content adaptation systems [D]. Edinburgh: The College of Science and Engineering, The University of Edinburgh, 2010.
- [7] Jie Ding, Hillston J, Laurensen D I. Evaluating the response time of large scale content adaptation systems using performance evaluation process algebra [C] // 2010 IEEE International Conference on Communications (ICC). Cape Town, 2010.
- [8] Hillston J. A compositional Approach to Performance Modelling [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [9] Jie Ding, Jane Hillston. Numerically representing stochastic process algebra models [J]. The Computer Journal, 2012, 55: 1 383–1 379.
- [10] Norris J, Markov Chains. Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

[责任编辑: 丁 蓉]