

无线传感器网络汇聚节点动态功耗管理方法

王毅, 张德运, 陈海荣

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对传统的功耗管理方法不能解决实际应用中汇聚节点能量资源有限而易成为网络瓶颈的问题,以及传统排队论的指数分布理论模型在处理无线网络业务流时无法准确描述自相似性问题,提出了一种无线传感器网络汇聚节点动态功耗管理方法. 首先理论推导了节点在各个休眠状态的休眠阈值,采用定数截尾样本的一致最小方差无偏估计方法得到汇聚节点在持续空闲时间长度上服从 Pareto 分布的参数,在不影响网络性能的前提下,利用二维模糊控制器自适应地调整定数截尾样本选用窗口. 实验结果表明,该方法在满足网络性能约束的前提下,经动态调整节点的休眠深度,可减少约 40% 汇聚节点的能量开销、30% 的动态功耗管理切换时延,提高约 56% 的切换成功率,从而避免了汇聚节点易成为网络瓶颈节点的问题,有效延长了汇聚节点的工作寿命.

关键词: 无线传感器网络; 汇聚节点; 动态功耗; 节点寿命

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)02-0138-05

Dynamic Power Management of Sink Node of Wireless Sensor Networks

WANG Yi, ZHANG Deyun, CHEN Hairong

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A novel dynamic power consumption management (DPCM) method is proposed for the sink node of wireless sensor networks (WSN), in which the sleeping threshold of each node in sleeping status is deduced theoretically by utilizing the uniformly minimum variance unbiased estimation (UMVUE) of fixed truncated samples to obtain the parameters of idle duration that obey the Pareto distribution. On the premise of no effect on performance of WSN, the fixed truncated samples are adaptively adjusted to select the window size by using a two-dimension fuzzy controller. The simulation results show that the proposed DPCM algorithm can dynamically regulate the sleep depth of nodes while satisfying the network performances, reduce about 40% of the energy consumption of the sink node and about 30% switching latency of DPCM, and increase about 56% of the success ratio of switching, thereby the problem that the sink node is easily to become a "bottleneck node" can be avoided, and the sink node's lifetime is effectively improved.

Keywords: wireless sensor networks; sink node; dynamic power consumption; node lifetime

传感器网络系统通常由大量传感器节点和一个或几个汇聚节点组成^[1]. 汇聚节点是一个功能增强的传感器节点,具有相对较多的能量、内存和计算资源,同时承担着更多的计算、数据管理和数据收发等工作,且独有某些特定的工作,如协议栈转换、数据

融合、数据转换、网络管理、网络任务发布等^[1],所以有效使用片上有限的各种资源,尤其是严格受限的能量资源,避免汇聚节点成为网络瓶颈节点,是无线传感器网络研究中需要重点关注的问题^[1-2]. 近年来,针对无线传感器网络已提出了一些节点功耗管

理方法^[2-3],它们通常只考虑传感器节点的优化问题,默认汇聚节点具有极强的计算能力和非受限的能量.为了解决传统方法的不足,本文提出了一种新颖的汇聚节点动态功耗管理方法.

1 问题描述及状态模型

无线传感器网络的汇聚节点由多个模块构成,各模块具有不同的工作状态,各状态又有不同的功耗.汇聚节点的有效状态^[2]如表1所示.

表1 汇聚节点的有效状态

休眠状态	处理模块	存储模块	数据转换模块	无线通信模块
S_0	活动	活动	活动	传送、接收
S_1	活动	空闲	休眠	接收
S_2	休眠	活动	活动	接收
S_3	休眠	休眠	空闲	接收

从能量开销的角度来看,在一次状态的切换过程中,如果状态切换后的节点保持新休眠状态的时间过短,节点用于状态切换的能量开销与保持新状态的能量开销之和很可能大于继续保持原状态的能量开销,如此切换是毫无意义的.从时间开销的角度来看,由于状态切换需要时间,所以汇聚节点存在服务延迟,这使得某些服务请求不能及时处理,乃至造成网络性能下降.因此,动态功耗管理(DPM)算法需权衡状态切换,以避免不合理的状态切换而导致能耗增加和服务响应延迟.

2 汇聚节点的 DPM 模型

2.1 休眠阈值模型

设汇聚节点在 t_1 时刻处理完成此前到达的任务,经过时间间隔 t_i ,下一个业务请求在 $t_2 = t_1 + t_i$ 时刻到达并进入任务队列,此时汇聚节点激活且开始处理任务,其状态切换步骤描述如下.

(1)汇聚节点在 t_1 时刻决定从活动状态 S_0 切换到某一休眠状态 $S_i (i \in [1, 2, 3])$,此次状态切换所需时长为 τ_s^i .

(2)汇聚节点一旦进入休眠状态 S_i ,其保持时长为 $t_i - \tau_s^i$.

(3)在 t_2 时刻,下一个业务请求到达并接纳、进入任务队列,此时汇聚节点激活且开始处理任务,其状态由 S_i 切换到活动状态 S_0 ,状态切换所需时长为 τ_w^i .

汇聚节点在上述3个步骤的能量开销分别为 $((P_0 + P_i)/2)\tau_s^i$ 、 $P_i(t_i - \tau_s^i)$ 和 $((P_0 + P_i)/2)\tau_w^i$.

设汇聚节点一次成功的状态切换可节省的能量

$$E_{\text{save}} = P_0 t_i - \left(\frac{P_0 + P_i}{2} \right) (\tau_s^i + \tau_w^i) - P_i (t_i - \tau_s^i) = (P_0 - P_i) t_i - \left(\frac{P_0 - P_i}{2} \right) \tau_s^i - \left(\frac{P_0 - P_i}{2} \right) \tau_w^i \quad (1)$$

当且仅当 $E_{\text{save}} \geq 0$,此次状态切换才有意义,由此可得一组对应 S_i 的休眠阈值 T_i .当功耗可控部件预测节点的持续空闲时长 $t_i \geq T_i$ 时,节点才会切换到状态 S_i .综上可得 T_i 至少应满足

$$T_i = \min(t_i) = \frac{1}{2} \left[\tau_s^i + \left(\frac{P_0 + P_i}{P_0 - P_i} \right) \tau_w^i \right] \quad (2)$$

2.2 业务请求的到达时间间隔的概率分布

研究及实验表明,在一定时间范围内的无线网络业务流之间具有相关性,即业务请求的到达时间具有自相似性^[4-7],其时间间隔服从重尾分布^[6-8]. Pareto分布是一类典型的重尾分布,本文假设 t_i 服从 Pareto 分布,则预测汇聚节点 t_i 的问题可转化为参数估计问题.

2.3 t_i 服从 Pareto 分布的参数估计

本文采用的是小样本场合下的定数截尾样本一致最小方差无偏估计(UMVUE)^[9],则 t_i 服从 Pareto 分布的定数截尾样本的对数似然函数为

$$l(c, \alpha) = \ln \frac{n!}{(n-r)!} + r \ln \alpha + r \alpha \ln c - (\alpha + 1) \sum_{k=1}^r \ln t_k + \alpha(n-r) \ln \left(\frac{c}{t_r} \right) \quad (3)$$

参数 (c, α) 的极大似然估计

$$\hat{c} = t_1$$

$$\hat{\alpha} = r \left[\sum_{k=1}^r \ln t_k - (n-r) \ln t_r - n \ln t_1 \right]^{-1} = \left(\frac{T_r}{r} \right)^{-1} \quad (4)$$

式中: $T_r = \sum_{k=1}^r \ln t_k - (n-r) \ln t_r - n \ln t_1$.

在小样本定数截尾场合下, (t_1, T_r) 是 (c, α) 的完备充分估计,文献[9]给出了证明方法,这里不再赘述.因为 (c, α) 的一致最小方差无偏估计 $(\hat{c}, \hat{\alpha})$ 是完备充分估计 (t_1, T_r) 的函数^[10],且其极大似然估计量 $\hat{c}$ 与 $\hat{\alpha}$ 相互独立.综上可得

$$\hat{c}_u = \left[1 - \frac{r}{n(r-1)\hat{\alpha}_u} \right] \hat{c} = \left[1 - \frac{T_r}{n(r-1)} \right] t_1 \quad (5)$$

$$\hat{\alpha}_u = \left(\frac{r-2}{r} \right) \hat{\alpha} = \left(\frac{T_r}{r-2} \right)^{-1} \quad (6)$$

式(5)、式(6)解出的 $(\hat{c}_u, \hat{\alpha}_u)$ 是 (c, α) 的一致最小方差无偏估计,该估计的方差分别为

$$\text{var}(\hat{c}_u) = \frac{r}{n(r-1)\alpha(n\alpha-2)}c^2 \quad (7)$$

$$r > 1, n > (2/\alpha)$$

$$\text{var}(\hat{\alpha}_u) = \frac{1}{r-3}\alpha^3 r > 3 \quad (8)$$

2.4 窗口大小的定数截尾样本自适应调整策略

为了准确预测 t_i ,DPM须跟踪 t_i 服从Pareto分布的参数 (c, α) 变化,为此提出基于模糊逻辑的窗口大小定数截尾样本的自适应调整策略,其二维模糊控制器设计如下:缓冲区任务队列为被控对象;任务队列长度 $q(t)$ 和队列长度变化 $dq(t)$ 为逻辑控制器的输入参数;窗口的调整量 C 为逻辑控制器的输出参数。

根据实际情况可将 $q(t)$ 模糊量化为 Q ,其模糊语言取值内容包括空队列(NM)、短队列(NS)、合适队列(Z)、长队列(PS)、满队列(PM)、拥塞队列(PB);将队列长度的变化 $dq(t)$ 模糊量化为 q ,其模糊语言取值内容包括快减(nM)、慢减(nS)、不变(z)、慢增(pS)、快增(pM)。窗口的调整量 C 的模糊语言取值内容包括负大(NB)、负略大(NRB)、负中(Nm)、负略中(NRM)、负小(Ns)、负略小(NRS)、零(0)、正略小(PRS)、正小(Ps)、正略中(PRM)、正中(Pm)、正略大(PRB)、正大(Pb)。

综上,二维模糊控制原理及过程如图1所示。

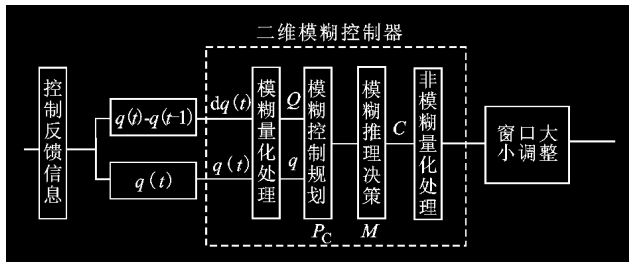


图1 二维模糊控制器原理框图

Q, q, C 的论域为

$$Q = \left(0, \frac{1}{4}n, \frac{1}{2}n, \frac{3}{4}n, \frac{7}{8}n, n\right)$$

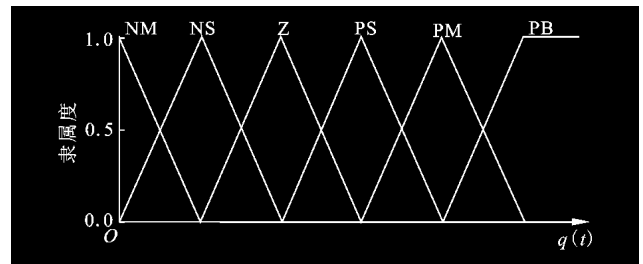
$$q = \left(-\frac{1}{3}, -\frac{1}{4}, 0, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}\right)$$

$$C = \left(-\frac{1}{2}r, -\frac{9}{20}r, -\frac{7}{20}r, -\frac{1}{4}r, -\frac{3}{20}r, -\frac{1}{20}r, 0, \right.$$

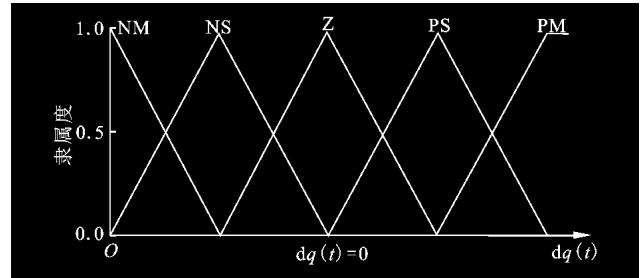
$$\left. \frac{1}{20}r, \frac{3}{20}r, \frac{1}{4}r, \frac{7}{20}r, \frac{9}{20}r, \frac{1}{2}r\right)$$

式中: n 为存储模块缓冲区可接纳任务数; r 为统计样本数; C, Q 集合各元素取值均向下取整。选用三角形函数作为隶属度函数,则 $q(t), dq(t), C$ 的隶属

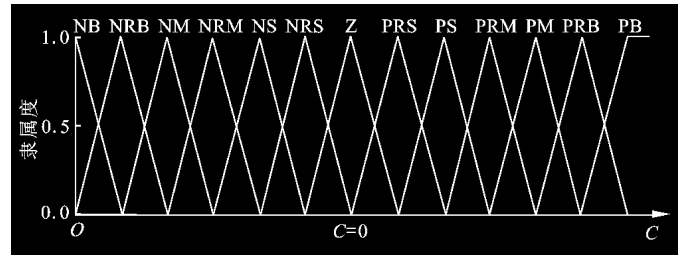
度函数如图2所示。



(a) $q(t)$



(b) $dq(t)$



(c) C

图2 $q(t), dq(t), C$ 的隶属度函数

二维模糊控制器的控制规则为

$$P_C: \text{if } Q_i \text{ and } q_j \text{ then } U_{i,j}$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n$$

该规则的模糊关系可描述为^[10]

$$R = (QC) \cdot (qC) = \bigcup_{i,j}^N Q_i \otimes q_j \otimes C_{i,j}$$

同样, R 的隶属度函数为

$$\mu_R(q(t), dq(t), c) =$$

$$\max(\mu_{Q_i}(q(t)) \wedge \mu_{q_j}(dq(t)) \wedge \mu_{C_{i,j}}(c))$$

其中, $dq(t) \in q, q(t) \in Q, c \in C, i, j \in N$ 。

本文用最小最大重心法^[10]求解模糊控制量,其中

$$C = (Q \otimes q) \otimes R$$

则 C 的隶属度函数为

$$\mu_C(c) = \max(\mu_R(q(t), dq(t), c) \wedge$$

$$\mu_Q(q(t)) \wedge \mu_q(dq(t)))$$

根据实验结果建立的控制规则如表2所示,这种规则也可根据任务加以调整,以达到更优的效果。

综上获得的汇聚节点 t_i 的预测程序步骤如下。

(1)根据现有 r 的大小,对任务进行采样.

(2)分析采样样本,得到 $q(t)$ 与 $dq(t)$,并将其模糊量化为 Q, q ,作为输入参数送入模糊控制器.

表2 模糊控制规则表

q	Q					
	NM	NS	Z	PS	PM	PB
nM	Pb	PRB	Ps	PRS	0	NB
nS	PRB	PRS	Ps	0	Ns	NRB
z	PRM	Ps	0	NRS	NRS	NRM
pS	Pm	0	NRS	Ns	NRM	NRB
pM	PRS	NRS	Ns	NRS	Nm	NB

(3)二维模糊控制器经模糊决策得到 C ,再经模糊处理后得出模糊输出 θ ,将 θ 送入 DPM 控制器,随后将 r 调整为 $r+\theta$.

(4)根据 $r+\theta$,重新对任务队列进行采样.

(5)将统计样本值送入参数估计器,得出 t_i 服从 Pareto 分布的无偏参数估计.

(6)将参数估计输入 DPM 控制器,以完成对 t_i 的预测,再根据式(2)裁定节点是否进行状态切换及切换到何种休眠状态.

3 实验与性能分析

本文使用 NS2 模拟器构建了无线传感器的网络模拟环境,其实验参数配置为:网络区域 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$,节点数量为 $500 \sim 800$ 个,节点传输半径为 35 m ,数据包长为 512 b ,汇聚节点数为 1,MAC 协议为 IEEE 802.15.4,路由协议为定向扩散协议.

汇聚节点的功耗状态及各状态切换到状态 S_0 所需的时间如表 3 所示.

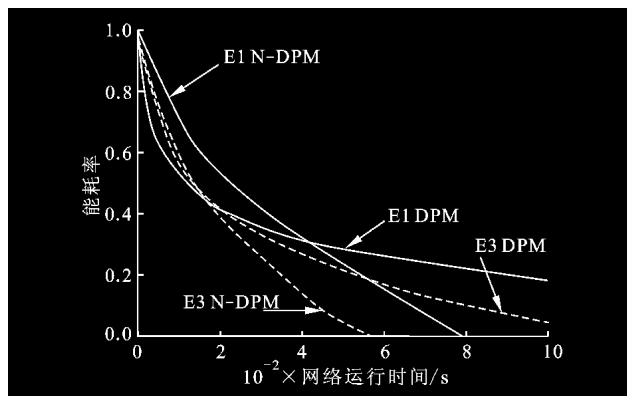
表3 汇聚节点各状态的功耗及切换时间

休眠状态	S_0	S_1	S_2	S_3
功耗/mW	1 040	800	470	120
切换时间/ms	—	5	15	42

实验1 考察本文 DPM 模型及二维模糊控制器的性能.实验设置分以下 3 种情况: E1,即网络节点数为 500,窗口初始任务数为 30; E2,即网络节点数为 600,窗口初始任务数为 40; E3,即网络节点数为 800,窗口初始任务数为 80.

图 3 显示了在 E1、E3 中汇聚节点的能耗率随无线传感器网络运行时间的变化情况,从中看出,本文方法的曲线变化更为平缓.图 4 显示了在 E1~E3 中 r 随无线传感器网络运行时间的变化情况,从中看出, r 将随着运行时间的增加而趋于稳定,且波动

较小,这说明本文的窗口定数截尾样本自适应调整策略适用于无线网络环境,并具有较好的稳定性.



N-DPM:没有采用任何优化措施;DPM:采用本文方法

图3 节点能量剩余比例变化

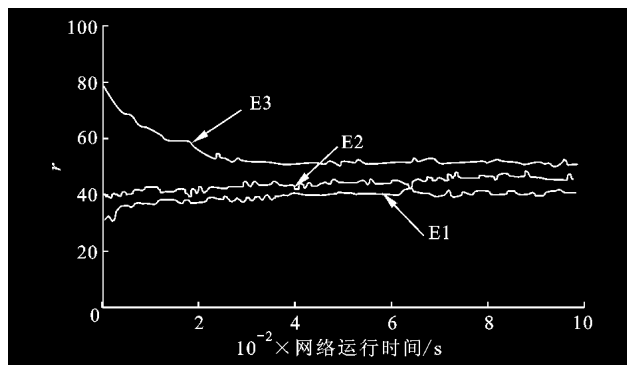


图4 样本窗口大小的变化

实验2 使用以下 4 种算法进行对比实验,算法详细设置见表 4.节点数固定为 800,实验次数为 50,对比实验量化指标取自 50 次实验的平均值.

选用能耗率(时长为 $1\,000\text{ s}$)、延迟率和切换成功率 3 个量化指标进行算法性能评价,能耗率为使用算法前、后的节点能耗之比,延迟率为切换延迟与休眠阈值的时长之比,切换成功率为及时切换成功次数与总切换次数之比.

表4 对比算法实验设置情况

算法	参数	算法具体内容
A1	$\alpha=1, c=2$	不使用任何预测方法.
A2	$\alpha=1, c=2$	固定时限 $T=100\text{ ms}$ 为变化阈值.
A3	初始设置 $\alpha=1, c=2$	$T=50\text{ ms}$ 为预测 t_i 的样本采样点,用加权平均法估算各采样点变量,在平均最大延迟为 10% 的情况下,线性规划下一个时间长度.
A4	初始设置 $\alpha=1, c=2$	采用滑动平均法预测下一次 t_i ,确定参数并根据预测结果决定是否进行模式切换.

表5列出了不同算法的实验结果,从中看出:由于A1、A2没有考虑业务流的自相似性,所以存在能耗过大的问题,特别是当A2的切换时间固定,其能耗更大;A3可节能,但切换延迟率过高,且其内需开销较大;A4节能效果不明显,同时 t_i 的预测值波动性较大.本文算法的能耗率、延迟率及切换成功率优势显著,实验结果也说明了这一点.

表5 各算法仿真实验结果

算法	能耗率	延迟率	切换成功率
A1	1.000	1.000	0.001 4
A2	1.126	0.758	0.013 5
A3	0.762	0.694	0.619 4
A4	0.914	0.452	0.542 1
本文	0.449	0.084	0.937 1

4 结束语

有效利用片上有限的各种资源(尤其是严格受限的能量资源),避免汇聚节点成为网络瓶颈节点,是无线传感器网络需要重点关注的问题.针对这一问题,本文提出了一种无线传感器网络汇聚节点动态功耗管理方法.该方法考虑了无线网络业务流的自相似性,及传统排队论的指数分布理论模型在处理该问题上的局限性,从理论上推导了节点在各个休眠状态的休眠阈值,并采用定数截尾样本的一致最小方差无偏估计方法得到汇聚节点 t_i 服从Pareto分布的参数,这样在不影响网络性能的前提下,利用二维模糊控制器可自适应调整定数截尾样本的 r 值.实验结果显示,采用本文方法可使汇聚节点预测更加准确,状态切换及时,从而优化了节点能耗,延长了汇聚节点的工作寿命.

参考文献:

- [1] 孙利民,李建中,陈渝,等.无线传感器网络[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [2] SINHA A, CHANDRAKASAN A. Dynamic power management in wireless sensor networks [J]. IEEE Design & Test of Computers, 2001, 18(4): 62-74.
- [3] 田丰民,陈向东,张传武.无线传感器网络动态功率管理方法[J].传感器技术, 2005, 24(11): 33-35.
TIAN Fengmin, CHEN Xiangdong, ZHANG Chuanwu. Dynamic power management in wireless sensor network [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2005, 24(11): 33-35.
- [4] 吴琦,熊光泽.非平稳自相似业务下自适应动态功耗管理[J].软件学报, 2005, 16(8): 1499-1505.
WU Qi, XIONG Guangze. Adaptive dynamic power management for non-stationary self-similar requests [J]. Journal of Software, 2005, 16(8): 1499-1505.
- [5] AHLEHAGH H, MICHALSON W R. Statistical characteristics of wireless networks traffic and its impact on ad hoc networks performance [EB/OL]. [2003-12-15]. <http://www.scs.org/getDec.cfm?id=2091>.
- [6] XIE Ming, YE Wu, FENG Suili, et al. Performance of a queuing model with pareto input traffic for wireless network nodes [C]//Proceedings of Wireless Communications, Networking and Mobile Computing 2005. Piscataway, USA: IEEE, 2005: 867-870.
- [7] KULKARINI S S, PATTATREYA G R. Statistically multiplexed adaptive operation of ad hoc networks with self-similar traffic [C]//IEEE Emerging Technologies Symposium on Wireless Communications and Systems 1999. Piscataway, USA: IEEE, 1999: 1-5.
- [8] FELDMANN A, WHITT W. Fitting mixtures of exponentials to long-tail distributions to analyze network performance models [C]//Proceedings IEEE INFOCOM. Piscataway, USA: IEEE, 1997: 1096-1104.
- [9] MICHAEL S T. Estimation of reliability parameter based on censored samples [C]//3rd International Conference on Mathematical Methods in Reliability. Trondheim, Norway: World Scientific, 2002: 278-289.
- [10] 李士勇.模糊控制、神经控制和智能控制论[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1996.

(编辑 苗凌)