

无线传感器网络可分负载调度算法

代亮¹, 许宏科¹, 陈婷²

(1. 长安大学电子与控制工程学院, 710064, 西安; 2. 长安大学信息工程学院, 710064, 西安)

摘要: 为了节省传感器节点能量, 提高网络资源利用率, 提出了一种无线传感器网络可分负载调度 (DLSW) 算法. DLSW 算法以 LEACH 协议为基础, 分群内和群间两阶段进行任务调度. 在群内调度阶段, 群内节点共享同一信道, 相继向群首发送数据; 在群间调度阶段, 群首节点和 SINK 节点之间独立的信道使得群首将群内节点报告的数据融合后, 并行向 SINK 节点传送结果, 同时完成数据发送. DLSW 算法通过去除节点间的通信干扰使得总任务完成时间减少、资源利用率提高. 实验结果表明, 在大规模的网络环境下, DLSW 算法可以使总任务完成时间减少 20%, 网络能耗减少 10%.

关键词: 无线传感器网络; 任务调度; 可分负载; 数据融合

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)06-0023-06

A Scheduling Algorithm with Divisible Load in Wireless Sensor Networks

DAI Liang¹, XU Hongke¹, CHEN Ting²

(1. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: A divisible load scheduling algorithm (DLSW) in wireless sensor networks is proposed to reduce the energy-consumption of sensors and to improve network resource utilization. DLSW consists of two phases: intra-cluster task scheduling and inter-cluster task scheduling. All intra-cluster node share the same channel to the cluster head, and DLSW makes each intra-cluster node send its result to the cluster head sequentially during the intra-cluster task scheduling. The independent channel between each cluster head and the SINK makes the cluster heads to fuse the data from intra-cluster nodes and then send fused data to SINK concurrently during inter-cluster task scheduling. The DLSW algorithm reduces the time to complete the task and improves network resource utilization by removing communication interference and idle. Simulation results show that the proposed algorithm enables the makespan reduced by 20%, and energy consumption reduced by 10% in large-scale wireless sensor networks.

Keywords: wireless sensor networks; task scheduling; divisible load; data fusion

有向无环图^[1]和独立任务集^[2]是无线传感器网络中常用的任务调度建模工具, 以这两类模型建模的任务调度问题都是 NP 完全的. 可分负载理论^[3-4]为无线传感器网络任务调度提供了一个有效的解决方案^[5-9]. 与其他无线传感器网络任务调度问题的启发式解决方案^[1-2]不同, 可分负载调度方案不仅可

以得到最优解, 而且可以得到解析解, 从而保证了调度结果的一致性. 现有的基于可分负载理论的无线传感器网络任务调度算法都是在单层树型网络拓扑^[5-7], 或者同构的分群网络拓扑^[8-10]下进行研究的.

本文提出了分群结构下异构无线传感器网络可

分负载调度(DLSW)算法,并用马尔科夫链模型对任务调度问题进行了分析. DLSW 算法的目标是得到 SINK 节点给群首节点及群首节点给群内节点分配任务比例的最优解,以使任务在最短的时间内执行完,并且能充分地利用网络资源.

1 问题描述

无线传感器网络在其生命周期里要进行多次分群,每次分群会有群建立和群稳定 2 个阶段^[11]. 本文所讨论的调度算法在某次分群的群稳定阶段执行,来寻求最优的任务调度策略,以减少总任务完成时间,提高网路资源利用率. 假定在某次群稳定阶段,网络中一共有 k 个群,分别表示为 $C_i, i=1, \dots, k$. 群首节点表示为 H_i ,群内分别有 n_i 个节点,群首和 SINK 节点的通信链路表示为 l_i . 群 C_i 内的普通节点表示为 $n_{i,j} (i=1, \dots, k; j=1, \dots, n_i)$;群内节点 $n_{i,j}$ 和群首 H_i 的通信链路用 $l_{i,j}$ 来表示. 本文所讨论的无线传感器网络拓扑结构如图 1 所示.

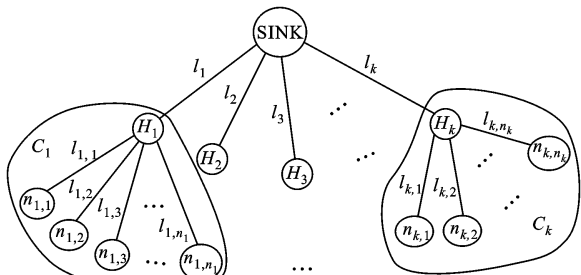


图1 本文算法的网络拓扑图

在网络中,定义 $y_{i,j}$ 是节点 $n_{i,j}$ 相对于标准处理器的数据采集速度; $z_{i,j} (z_i)$ 是第 $l_{i,j} (l_i)$ 条链路相对于标准链路的传输速度; w_i 是群首 H_i 相对于标准处理器的计算(数据融合)速度; φ_i 是群首 H_i 的信息效用常量^[8,12].

SINK 节点首先将负载划分为 k 个部分,并将这些子负载发送给 k 个群首,群首 H_i 再将其负责的负载划分为 n_i 个部分并将其发送给群内的 n_i 个节点. 定义 α_i 是 SINK 节点分配给群首 H_i 的负载百分比, $\alpha_{i,j}$ 是群首节点 H_i 分配给群内节点 $n_{i,j}$ 的负载百分比,由定义可知

$$\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1 \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} \alpha_{i,j} = \alpha_i \quad (2)$$

定义 T_{ms} 是整个采集业务在标准处理器上完成的时间, T_{cm} 是在标准链路上传输这个应用的全部输

入数据的时间, T_{cp} 是整个应用在标准处理器上数据融合的时间^[5-9], 则 $\alpha_{i,j} y_{i,j} T_{ms}$ 是节点 $n_{i,j}$ 采集相应负载的时间, $\alpha_{i,j} z_{i,j} T_{cm}$ 是节点 $n_{i,j}$ 通过第 $l_{i,j}$ 条链路向群首 H_i 发送相应采集数据的时间, $\alpha_i w_i T_{cp}$ 是群首 H_i 融合群内节点报告的数据的时间, $\varphi_i \alpha_i z_i T_{cm}$ 是群首 H_i 将融合后的数据报告 SINK 节点所需的时间, t_i 是网络中第 i 个群完成相应的负载并报告 SINK 节点所需的时间, T_f 是整个系统响应的时间.

2 调度算法

本文提出的 DLSW 算法建立在 Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) 协议^[13]之上. DLSW 算法分为群内调度和群间调度 2 个阶段. 在群内调度阶段,群内节点同时开始采集数据,由于群内节点共享同一信道,群内节点相继向群首报告采集结果. 群内节点任务处理时序图如图 2 所示. 在群间调度阶段,群首节点收集数据并做数据融合后,由于每个群首和 SINK 节点都有独立的信道,所以可以并行向 SINK 节点报告数据. 群间任务处理时序图如图 3 所示.

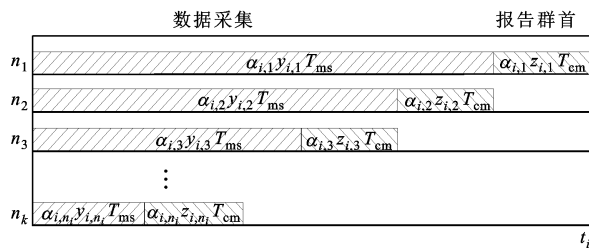


图2 群内节点任务处理时序图

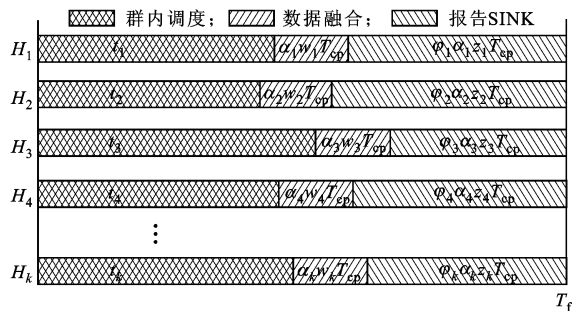


图3 群间任务处理时序图

2.1 群内调度

群首 H_i 所得的负载最优的分配方案如下式所示

$$\alpha_{i,j-1} y_{i,j-1} T_{ms} = \alpha_{i,j} y_{i,j} T_{ms} + \alpha_{i,j} z_{i,j} T_{cm} \quad (3)$$

$$i = 2, 3, \dots, k$$

在式(3)中令

$$s_{i,j} = y_{i,j-1} T_{ms} / (y_{i,j} T_{ms} + z_{i,j} T_{cm})$$

$$i = 2, 3, \dots, k \quad (4)$$

可得到递归等式(3)的通用表达式

$$\alpha_{i,j} = s_{i,j} \alpha_{i,j-1} \quad (5)$$

由图2及式(2)、式(5)可知,获得任务最多的节点的任务比例为

$$\alpha_{i,1} = \alpha_i / (1 + \sum_{j=2}^{n_i} \prod_{k=2}^j s_{i,k}) \quad (6)$$

由式(5)、式(6)可知,其他 $n_i - 1$ 个节点获得的任务比例为

$$\alpha_{i,j} = \alpha_i \prod_{k=2}^j (s_{i,k}) / (1 + \sum_{j=2}^{n_i} \prod_{k=2}^j s_{i,k}) \quad (7)$$

由图2及式(6)可知,群 C_i 完成数据采集和数据报告的时间为

$$t_i = \alpha_i (y_{i,1} T_{ms} + z_{i,1} T_{cm}) / (1 + \sum_{j=2}^{n_i} \prod_{k=2}^j s_{i,k}) \quad (8)$$

2.2 群间调度

为了更好地重叠任务执行时间和通信时间,根据可分负载理论,可得

$$t_i + \alpha_i \omega_i T_{cp} + \varphi_i \alpha_i z_i T_{cm} = t_j + \alpha_j \omega_j T_{cp} + \varphi_j \alpha_j z_j T_{cm}$$

$$i, j = 1, \dots, k, \quad i \neq j \quad (9)$$

在式(8)中,令 $g_i = (y_{i,1} T_{ms} + z_{i,1} T_{cm}) / (1 +$

$\sum_{j=2}^{n_i} \prod_{k=2}^j s_{i,k})$, 并代入式(9), 可得

$$\alpha_i r_i = \alpha_j r_j \quad (10)$$

式中: $r_i = g_i + \omega_i T_{cp} + \varphi_i z_i T_{cm}$; $r_j = g_j + \omega_j T_{cp} + \varphi_j z_j T_{cm}$. 由式(1)、式(10)可得

$$\alpha_i = (1/r_i) / \sum_{i=1}^k (1/r_i) \quad (11)$$

此时可得到总任务完成时间为

$$T_f = T_i = t_i + (\omega_i T_{cp} + \varphi_i z_i T_{cm}) (1/r_i) / \sum_{i=1}^k (1/r_i) \quad (12)$$

从以上分析可以看出,在同构无线传感器网络环境中,各个群及群内节点的性能参数(采集速度、通信速度、数据融合速度、信息效用常量)相同,每个群有 n 个节点,则 SINK 节点可将负载平均分配给各个群首,每个群应得的负载为

$$\alpha_i = 1/k \quad (13)$$

可得到在同构无线传感器网络条件下,总任务的最小完成耗时为

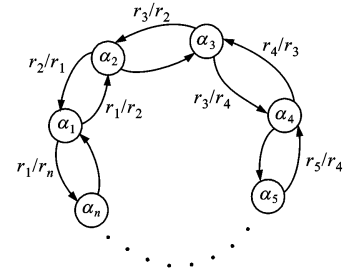
$$T_f = (D + \omega T_{cp} + \varphi z T_{cm}) / k \quad (14)$$

式中: $D = (y T_{ms} + z T_{cm}) / n$.

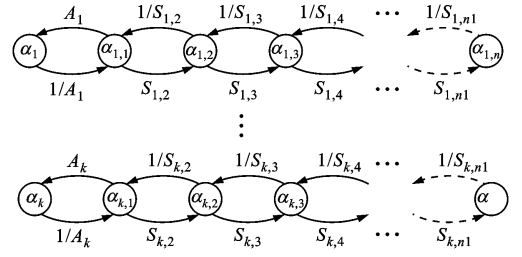
在现有的各种无线传感器网络分群算法中,当网络密集部署时,网络密度越大,网络的群数越多,由式(14)可知,当群数 k 趋向于 ∞ 时, T_f 趋向于 0.

3 马尔科夫模型分析

本文提出了与可分负载调度算法等效的连续时间马尔科夫链模型,用马尔科夫链模型对任务调度问题进行分析,其中状态空间由各个节点所应获得的最优负载比例组成. 群首节点和群内节点的任务分配比例状态转换图如图4所示.



(a) 群首节点任务分配比例状态转换图



(b) 群内节点间任务分配比例状态转换图

图4 群首节点和群内节点的任务分配比例状态转换图

图4a表示各个群首节点所获得最优任务比例的马尔科夫链模型,图中 $r_i = g_i + \omega_i T_{cp} + \varphi_i z_i T_{cm}$,

其中 $g_i = (y_{i,1} T_{ms} + z_{i,1} T_{cm}) / (1 + \sum_{j=2}^{n_i} \prod_{k=2}^j s_{i,k})$. 图

4b表示各个群内节点所获得最优任务比例的马尔科夫链模型,图中 $s_{i,j} = y_{i,j-1} T_{ms} / (y_{i,j} T_{ms} +$

$z_{i,j} T_{cm})$, $A_i = 1 + \sum_{j=2}^{n_i} \prod_{k=2}^j s_{i,k}$.

可以看出,可分负载理论与马尔科夫链模型有一定的对等性,通过图4中马尔科夫链内相邻状态的局部平衡等式,可以得到与第2节相同的任务调度结果. 新模型可将可分负载调度的时序关系抽象成一种简单紧致的马尔科夫链模型,这样更容易分析大规模的无线传感器网络. 其中连续时间马尔科夫链模型与可分负载调度算法等效的证明见附录A.

4 能耗模型

本文采用 LEACH 协议^[13]的一阶无线电模型来建立无线传感器网络能耗公式. 定义节点采集和报告单位数据的能耗分别为 e_s 、 e_{tx} , 收发信息节点间的距离均为 d .

根据一阶无线电模型, 可得到第 i 个群中第 j 个节点的能量消耗为

$$E_{i,j} = \alpha_{i,j}(e_s + e_{tx}d^2) \quad (15)$$

$$i = 1, \dots, k, j = 1, \dots, n_i$$

5 仿真实验

本文对传感器节点采集速度、通信速度、数据融合速度和信息效用常量这 4 个系统参数对任务完成时间和群内节点能耗的影响进行了仿真分析.

在仿真中, 能耗参数: 单位距离报告单位数据消耗能量 $e_{tx} = 200$ nJ; 采集单位数据消耗能量 $e_s = 100$ nJ; 收发节点间的距离 $d = 100$ m; 每个群里有 30 个节点. 在仿真中令 $T_{ms} = T_{cm} = T_{cp} = 1$, 仿真结果如图 5、图 6 所示. 由于在无线传感器网络中, SINK 节点一般没有能量限制, 群首节点相对来说也是能量有保障的, 本文只考察群内节点的能耗情况. 不失一般性, 本文以第 1 个群的群内节点来研究能耗情况.

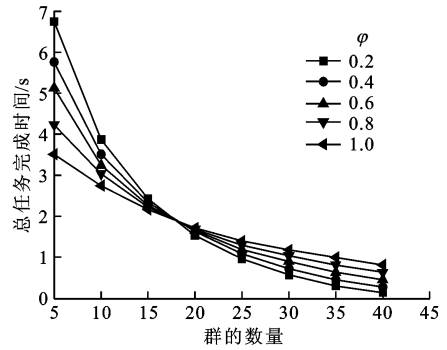
(1) 在研究信息效用常量的性能时, y 、 z 、 w 固定, 令 $w = y = z = 1.0$, φ 分别取 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0. 由图 5a 可以看出, 当群数目增大时, 总任务完成时间逐渐变小, 随着信息效用常量增加, 总任务完成时间减小的趋势越缓. 由图 6a 可以看出, 信息效用常量的选取对群内节点的能耗几乎没有影响, 随着任务的分配顺序, 群内节点能耗逐渐减小.

(2) 在研究群首节点数据融合速度的性能时, φ 、 z 、 y 固定, 令 $y = z = 1.0$, $\varphi = 0.5$, w 分别取 0.8、1.0、1.2、1.4、1.6. 由图 5b 可以看出, 当群数目增加时, 总任务完成时间减少. 由图 6b 可以看出, 随着任务的分配顺序, 群内节点能耗变小.

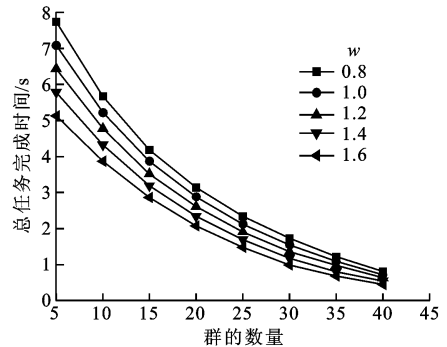
(3) 在研究节点采集速度的性能时, φ 、 z 、 w 固定, 令 $w = z = 1.0$, $\varphi = 0.5$, y 分别取 0.8、1.0、1.2、1.4、1.6. 由图 5c 可以看出, 节点采集速度的变化对总任务完成时间几乎没有影响. 图 6c 结果表明, 传感器节点采集速度越大, 群首则可将任务更加均衡地分配给各个群内节点, 因此群内节点的能耗越小.

(4) 在研究节点间通信速度的性能时, φ 、 w 、 y 固定, 令 $y = w = 1.0$, $\varphi = 0.5$, z 分别取 0.8、1.0、1.2、1.4、1.6. 如图 5d 所示, 当群数目增大时, 总任

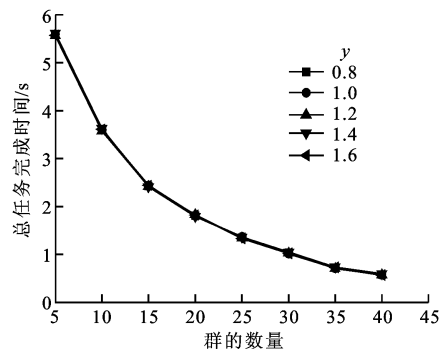
务完成时间变小, 随着节点间通信速度的增大, 总任务完成时间减小的趋势越缓. 如图 6d 所示, 节点间



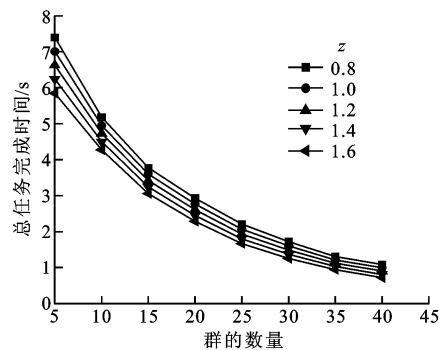
(a) φ 的影响



(b) w 的影响



(c) y 的影响



(d) z 的影响

图 5 各参数对完成任务耗时的影响

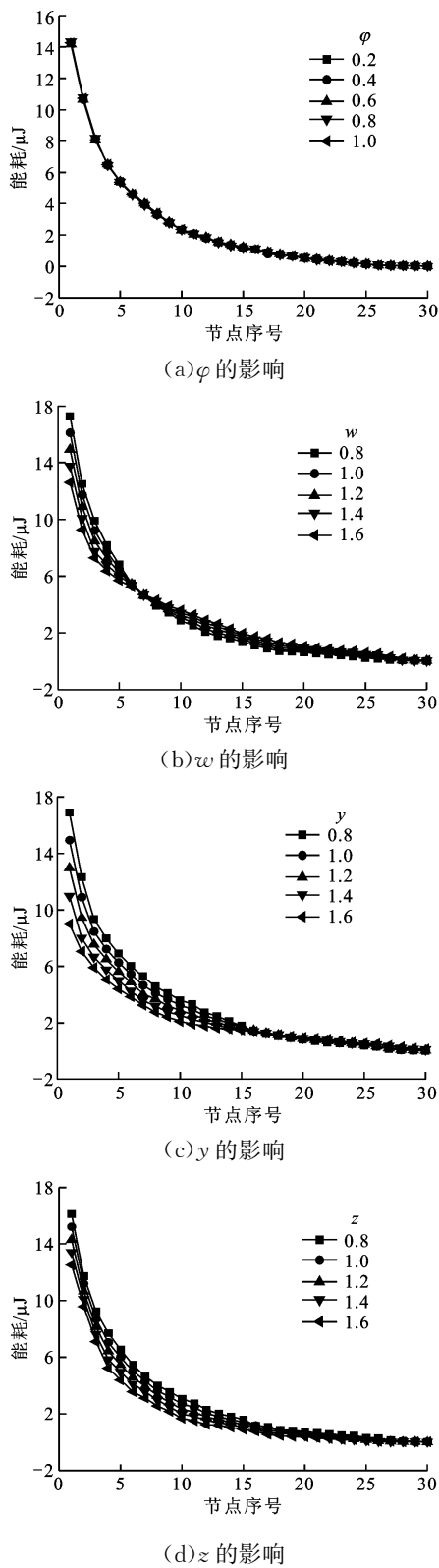
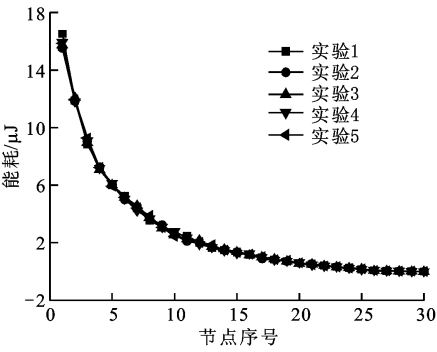
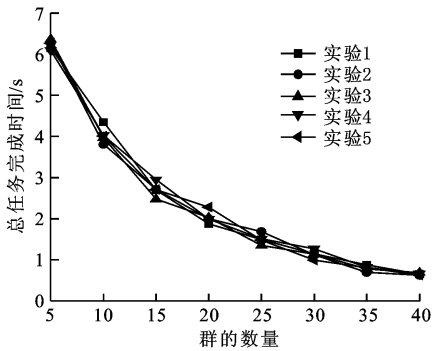


图 6 各参数对群内各节点能耗的影响

通信速度越大,群内节点能耗越小.

采用以下仿真参数对异构网络环境下的调度算法进行仿真:信息效用常量为 0.5,群首融合速度为 1.0,群内节点采集速度和节点间通信速度取[0.8~

1.2]之间的随机数.通过 5 次实验来进行异构网络环境下调度算法的性能分析.图 7、图 8 反映了在异构网络环境下,总任务完成时间和群内节点能耗的变化趋势.通过对比图 5 和图 6 可以看出:网络参数对总任务完成时间的影响比对能耗的影响小.随着网络规模的增加和群内任务分配顺序,总任务完成时间和节点能耗均是递减的.



6 结 论

本文提出了一种分群结构下的异构无线传感器网络任务调度算法,通过去除节点间的通信干扰来提高资源利用率和减少总任务完成时间,可得到总任务最合理的分配方案,使得任务在最短时间内完成且网络资源利用率最高.

参考文献:

[1] ZENG Zhiwen, LIU Anfeng, LI Deng, et al. A highly efficient DAG task scheduling algorithm for wireless sensor networks [C]// Proceedings of ICYCS 2008. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 570-575.

[2] LIN Jianyong, XIAO Wendong, LEWIS F L, et al. Energy-efficient distributed adaptive multisensor scheduling for target tracking in wireless sensor net-

- works [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(6):1886-1896.
- [3] BHARADWAJ V, GHOSE D, ROBERTAZZI T G. Divisible load theory: a new paradigm for load scheduling in distributed systems [J]. Cluster Computing, 2003, 6(1): 7-18.
- [4] JIA Jinxing, BHARADWAJ V, WEISSMAN J. Scheduling multi-source divisible loads on arbitrary networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2010, 21(4): 520-531.
- [5] MOGES M, ROBERTAZZI T G. Wireless sensor networks: scheduling for measurement and data reporting [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 327-340.
- [6] LIU Haoying, YUAN Xiaojing, MOGES M. An efficient task scheduling method for improved network delay in distributed sensor networks[C]//Proceedings of TridentCom 2007. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007:1-8.
- [7] LIU Haoying, SHEN Jian, YUAN Xiaojing, et al. Performance analysis of data aggregation in wireless sensor mesh networks[C]//Proceedings of Earth & Space 2008. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008:1-8.
- [8] CHOI K, ROBERTAZZI T G. Divisible load scheduling in wireless sensor networks with information utility [C]//Proceedings of IPCCC 2008. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 9-17.
- [9] LI Xiaolin, LIU Xinxin, KANG Hui. Sensing workload scheduling in sensor networks using divisible load theory [C]//Proceedings of the Global Telecommunications Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007:785-789.
- [10] CHOI K, ROBERTAZZI T G. Divisible load scheduling in clustered wireless sensor networks[D]. Stony Brook, NY, USA: Stony Brook University, 2009.
- [11] 王毅, 张德运, 梁涛涛. 无线传感器网络分区能耗均衡的非均匀分簇算法[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(4): 389-394.
WANG Yi, ZHANG Deyun, LIANG Taotao. Cell energy balanced uneven clustering hierarchy scheme for wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(4): 389-394.
- [12] 代亮, 沈中, 常义林, 等. 无线传感器网络多轮任务调度算法[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(6): 27-32.
DAI Liang, SHEN Zhong, CHANG Yilin, et al. An algorithm of multi-round task scheduling in wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,

sity, 2010, 44(6): 27-32.

- [13] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A. An application-specified protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.

附录 A

下面给出满足生灭过程典型排队 M/M/1 的模型.

定义 1 单服务台等待制 M/M/1 排队模型: 顾客来到的时间间隔 θ 服从参数 λ 的负指数分布, 服务员为顾客服务时间 η 服从参数 μ 的指数分布, 且 θ 与 η 相互独立, 1 个服务台, 系统容量为 ∞ 的等待制排队模型. 其中, λ 为单位时间平均到达的顾客数 (平均到达率), μ 为单位时间平均服务完的顾客数 (平均服务率).

定义 2 稳态概率: 如果 $\lim_{t \rightarrow \infty} p_k(t) = p_k$, 则称 $\{p_k, k=0, 1, \dots\}$ 是稳态解.

可以得到以下关于状态 k 的状态转移方程

$$\frac{dp_k(t)}{dt} = \lambda p_{k-1}(t) + \mu p_{k+1}(t) - \lambda p_k(t) - \mu p_k(t) \quad (A1)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\frac{dp_k(t)}{dt} = 0$, 可以得到以下稳态流方程

$$\mu p_1 - \lambda p_0 = 0, \lambda p_0 + \mu p_2 - \lambda p_1 - \mu p_1 = 0, \dots, \lambda p_{k-1} + \mu p_{k+1} - \lambda p_k - \mu p_k = 0 \quad (A2)$$

以上的方程组可以用 p_0 来构成一个递归方程

$$p_k = (\lambda/\mu)^k p_0 \quad (A3)$$

由于 p_k 为概率, 所以有归一化条件

$$\sum_{k=0}^{\infty} p_k = 1 \quad (A4)$$

由以上两式可得

$$p_0 + \sum_{k=1}^{\infty} p_k = p_0 + \sum_{k=1}^{\infty} p_0 (\lambda/\mu)^k = p_0 \sum_{k=0}^{\infty} (\lambda/\mu)^k = p_0 / (1 - \lambda/\mu) = 1 \quad (A5)$$

由此可得 $p_0 = 1 - \lambda/\mu$.

以 $\alpha_i(\alpha_{i,j})$ 作为稳态概率 p_i , 以网络性能参数作为迁跃概率 λ, μ , 即可形成连续时间马尔科夫链, 所以可以得出连续时间马尔科夫链模型与可分负载调度算法等效.

(编辑 刘杨)