

文章编号: 1000-8152(2011)09-1119-11

用可分负载理论分析无线传感器网络任务调度

代亮¹, 沈中², 常义林², 张颖², 闫中江²

(1. 长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064;

2. 西安电子科技大学 综合业务网理论与关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 针对无线传感器网络的任务如何在最短时间内完成且充分利用网络资源的问题, 提出了一种基于可分负载理论的无线传感器网络任务调度算法(WDTA). 该算法根据网络中各个节点的处理能力和节点间的通信能力, 将总任务从SINK节点下发至网络中. 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. 算法在两种分群结构的异构网络环境下进行了分析, 得到了在各个节点上最合理的任务分配方案, 以及最短的任务完成所需时间. 理论分析了基于可分负载理论的无线传感器网络任务调度的极限情况. 实验结果表明WDTA算法能够通过合理分配任务, 而减少任务完成时间及节点能耗. 该方案可以作为设计大规模无线传感器网络的原则.

关键词: 无线传感器网络; 分群结构; 任务调度; 可分负载理论

中图分类号: TP393 文献标识码: A

Analysis of task scheduling in wireless sensor networks based on divisible load theory

DAI Liang¹, SHEN Zhong², CHANG Yi-lin², ZHANG Ying², YAN Zhong-jiang²

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

2. State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract: To accomplish the tasks within a possibly shortest time, and fully use network resources, a task scheduling algorithm(WDTA) based on divisible load theory is proposed under clustering structure in wireless sensor networks. In WDTA, the tasks are distributed to wireless sensor network based on the processing and communication capacity of each sensor by SINK. By removing communication interference between each sensor, this algorithm achieves the reduction of the task-accomplishment time and improves the network resource utilization. Two kinds of heterogeneous clustering network settings are then analyzed in WDTA. The most reasonable scheme for task allocation in all nodes and the shortest time required to accomplish the tasks are also obtained. The limit case of task scheduling in wireless sensor networks is theoretically analyzed. Finally, simulation results show that the algorithm can reasonably distribute tasks to each sensor, and then effectively reduces the time-consumption and energy-consumption in task accomplishment. This scheme can be used as the design principle for large-scale wireless sensor networks.

Key words: wireless sensor networks; clustering structure; task scheduling; divisible load theory

1 引言(Introduction)

任务调度是无线传感器网络中的重要研究问题之一. 由于传感器节点能量有限, 所以任务应尽快完成, 以使用户能够根据采集的数据对监控区域做出及时有效的判断, 同时减少节点能耗、延长网络寿命. 用于无线传感器网络任务调度应用建模的工具通常是有向无环图(DAG)^[1]和独立任务集^[2~4], 其中有向无环图表示任务之间的数据依赖关系, 在调度过程中满足任务之间的数据依赖关系; 而独立任务集中各个任务在调度时不需要考虑任务之间的数据依赖关系. 在一般情况下, 基于这两类模型的调度问题都是NP(non-deterministic polynomial)完全的, 即不可能在多项式时间内找到问题的最优解.

可分负载理论^[5~7]为无线传感器网络的任务调度提供了一个有效解决方案^[8~13]. 可分负载理论的主要调度思想为: 网络的中心节点将任务根据网络中各个节点的处理能力和通信能力合理地分发给各个节点, 通过去除通信干扰和节点空闲导致的性能下降, 以使总任务完成时间减少和充分利用网络资源. 与其他无线传感器网络任务调度问题的启发式解决方案^[1~4]不同, 该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.

因此, 本文提出了分群结构下, 基于可分负载理论的无线传感器网络任务调度方法. 目标是得到在网络中SINK节点给群首节点, 群首节点给群内节点分配任务比例的最优解, 以使网络中的任务在最短

的时间内执行完,并且能充分地利用网络资源.

2 相关工作及本文贡献(Related works and our contributions)

文献[8]首次将可分负载理论应用于无线传感器网络上来进行任务调度分析.其应用环境是对于一个具体的数据采样空间来说,互不重叠地给每一个传感器节点分配一个采集子空间来采集数据.例如,采样空间覆盖一个很大的频率范围,可按照一定比例划分采集子空间,分配给不同的传感器来采集数据,以节省总任务完成时间及能耗.但是该文只是应用到了单层树型结构的网络.而在无线传感器网络中,与单层树型结构相比分群结构(即多层树形结构)具有很大优势^[14],如图1所示.文献[9]在文献[8]的基础上,增加了对数据采集和网络通信中存在的延时的分析,但其网络拓扑还是单层树型结构.文献[10]将可分负载理论应用于无线传感器网状网(wireless sensor mesh networks, WSNs)中来分析任务调度,其任务下发到结果上报也是基于单层树型结构的.文献[12]将可分负载理论用于只有单个群的无线传感器网络中,分析了可行的指令下发时间和最短的总任务完成时间.但由于分群结构的无线传感器网络都具有多个群,具有单个群的无线传感器网络没有太大的实用性,在这种网络结构下进行分析具有片面性.在文献[12]和文献[13]的第4章中,作者在多个群的网络架构下,基于可分负载理论,进行了无线传感器网络任务调度分析.在文献[12]中,作者假设网络是同构的(传感器节点具有相同的采集、通信和计算能力),在同构的环境下,分析了单层树结构和分群结构无线传感器网络的任务调度问题,得到了总任务完成时间和任务分配方案的最优解.在文献[13]中,作者将每个群抽象成一个等效节点,这样整个网络拓扑可视为单层树状结构.该文作者也假设了网络为同构环境,在4种条件下(单/多信道、有/无协处理器两两组合)分析了最短的总任务完成时间和加速比.本文提出了分群结构下,基于可分负载理论的无线传感器网络任务调度方法.在两种条件下(单信道/多信道),分析了异构无线传感器网络(每个传感器节点的采集、通信和计算能力各不相同)的任务调度问题.给出了异构网络环境下最短的总任务完成时间和最优地任务调度方案的解析解.并分别在同构网络环境下分析了任务调度的极限情况,即随着网络规模的增大,总任务完成时间的趋势.最后,针对于群首存储资源有限的情况下,给出了任务调度的线性规划模型,并分析其最优解的情况.在分群结构的无线传感器网络下,群首节点负责SINK节点和群内节点的数据交互.为了减少冗余数据的传输耗能、降低延迟、延长网络的生存期,在群首节点需要进行数据融合.在本文中,引入一种新的数据融合估算方法——信息效用常量^[11,15].信息效

用常量基于信息正确性估计技术,通过信息正确性估计,群首节点可以知道近似的数据融合比例.

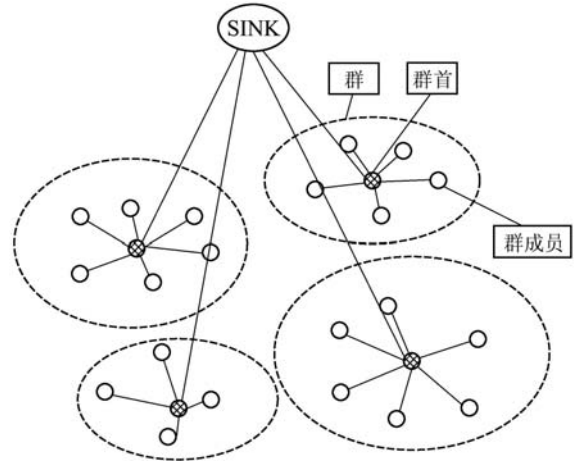


图1 无线传感器网络分群结构示意图

Fig. 1 Clustering structure of WSNs

3 问题描述(Problem formulation)

本文所讨论的无线传感器网络拓扑结构如图2所示.

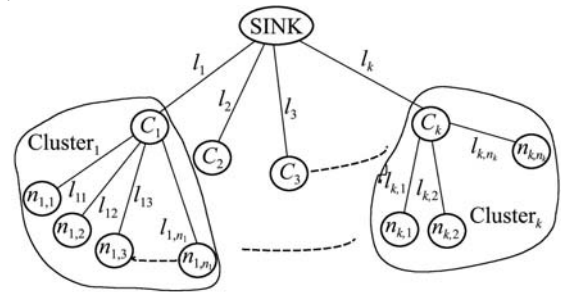


图2 网络拓扑图

Fig. 2 Network topology

假设在某次群稳定阶段,网络中一共有 k 个群,分别表示为 $\text{Cluster}_i (i = 1, \dots, k)$,每个群内群首节点分别表示为 C_i ,群内分别有 $n_i (i = 1, \dots, k)$ 个节点,群首和SINK节点的通信链路分别表示为 $l_i (i = 1, \dots, k)$.群内的普通节点分别表示为 $n_{i,j} (i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, n_i)$;群内节点和群首的通信链路分别用 $l_{i,j} (i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, n_i)$ 来表示.

$y_{i,j}$ 是节点 $n_{i,j}$ 相对于标准处理器的数据采集速度; $z_{i,j}$ 是第 $l_{i,j}$ 条链路相对于标准链路的传输速度; w_i 是群首 C_i 相对于标准处理器的计算(数据融合)速度; z_i 是第 l_i 条链路相对于标准链路的传输速度; φ_i 是群首 C_i 的信息效用常量^[11,15].

所谓的标准处理器和链路是作为参照的任何一处理器和链路,可以是网络中的任何一个处理器和链路,甚至为了方便可以是假想的处理器和链路^[8~13].

SINK节点首先将负载划分为 k 个部分,将这些子负载发送给 k 个群首.第 i 个群首 C_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 C_i 的负载百分

比; $\alpha_{i,j}$ 是群首节点 C_i 分配给群内普通节点 $n_{i,j}$ 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^[8~13]. 因此 $\alpha_{i,j}y_{i,j}T_{ms}$ 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 C_i 发送相应采集数据的时间, $\alpha_i w_i T_{cp}$ 是群首 C_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 C_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. 调度的目标是整个负载的处理时间 T_f 最小, 即各个群完成相应任务, 数据融合后并报告 SINK 节点所需时间 T_i 的最大值, 即 $T_f = \max\{T_1, T_2, \dots, T_k\}$.

由于和其他执行过程的耗时相比较, SINK 节点和群首节点下发任务给相应节点的耗时是微不足道的. 故在本文中, 忽略 SINK 节点、群首节点下发任务的耗时.

4 调度策略(Scheduling strategy)

本文考虑两种无线传感器网络任务调度模型^[8].

- 1) 同时开始采集数据, 相继报告数据: 群内节点同时开始采集数据, 假设群内节点共享同一信道, 根据可分负载理论, 为了去除通信的干扰和空闲导致的性能下降, 群内节点相继向群首报告采集结果. 群首节点收集群内节点采集的数据并做数据融合后, 假设各群首间也共享同一信道, 故也只能相继向 SINK 节点报告数据.
- 2) 同时开始采集数据, 同时完成报告数据: 群内节点同时开始采集数据, 假设群内各个节点和群首都有独立的信道, 所以可以并行向群首报告数据. 为了能够充分地利用链路带宽, 避免不同节点之间出现等待现象, 群内节点同时完成向群首报告数据. 群首节点收集数据并作数据融合后, 假设每个群首和 SINK 节点也都有独立的信道. 所以可以并行向 SINK 节点报告数据. 同样, 为了提高效率, 群首节点同时完成向 SINK 节点报告数据.

4.1 同时开始采集数据, 相继报告数据 (Simultaneous measurement start, sequential reporting)

同时开始采集数据, 相继报告数据模型如图3所示.

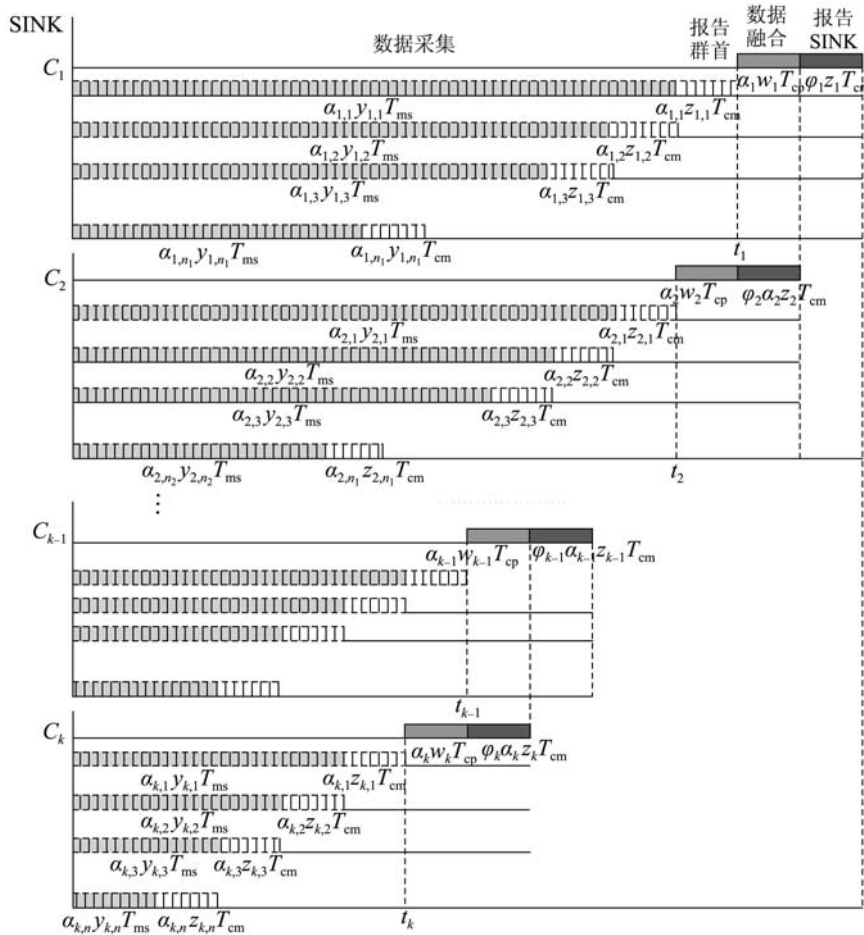


图 3 同时开始采集数据, 相继报告数据情形的时序图

Fig. 3 Timing diagram of simultaneous measurement start, sequential reporting strategy

对群首 C_i 所得的负载 α_i 最优的分配方案应该如以下等式所示:

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

在上式中, 令

$$s_{i,j} = y_{i,j-1}T_{ms}/(y_{i,j}T_{ms} + z_{i,j}T_{cm}), \quad (4)$$

可得到以上递归等式(3)的通用表达式

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

即 $\alpha_{i,j}$ 可以用 $\alpha_{i,1}$ 来表示为

$$\alpha_{i,j} = \prod_{k=2}^j s_{i,k}\alpha_{i,1}. \quad (6)$$

由式(2)(6)可得群内获得负载最多的节点的负载为

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

群内其他 $n_i - 1$ 个节点所获得的负载为

$$\alpha_{i,j} = \alpha_i \prod_{k=2}^j (s_{i,k}) / (1 + \sum_{j=2}^{n_i} \prod_{k=2}^j s_{i,k}). \quad (8)$$

由图3可以看出, 第一个节点完成向群首报告采集结果的时间, 也就是整个群需要的采集并报告群首的时间. 由式(7)可知, 第 i 个群完成数据采集和数据报告任务的时间可以用下式表示:

$$t_i = \alpha_i(y_{i,1}T_{ms} + z_{i,1}T_{cm}) / (1 + \sum_{j=2}^{n_i} \prod_{k=2}^j s_{i,k}). \quad (9)$$

由图3可看出各群首收集群内节点报告的数据并做数据融合, 报告SINK节点的时间满足下式:

$$t_i + \alpha_i w_i T_{cp} = t_{i+1} + \alpha_{i+1} w_{i+1} T_{cp} + \varphi_{i+1} \alpha_{i+1} z_{i+1} T_{cm}. \quad (10)$$

在式(9)中, 令

$$t_i = C_i \alpha_i, \quad (11)$$

其中 $C_i = (y_{i,1}T_{ms} + z_{i,1}T_{cm}) / (1 + \sum_{j=2}^{n_i} \prod_{k=2}^j s_{i,k})$. 带入式(10)可得

$$C_i \alpha_i + \alpha_i w_i T_{cp} = C_{i+1} \alpha_{i+1} + \alpha_{i+1} w_{i+1} T_{cp} + \varphi_{i+1} \alpha_{i+1} z_{i+1} T_{cm}. \quad (12)$$

令

$$g_i = (C_{i-1} + w_{i-1} T_{cp}) / (C_i + w_i T_{cp} + \varphi_i z_i T_{cm}), \quad (13)$$

可得到递归表达式(12)的通用表达式

$$\alpha_i = g_i \alpha_{i-1}, \quad (14)$$

即 α_i 可以用 α_1 来表示为

$$\alpha_i = \prod_{j=2}^k g_j \alpha_1. \quad (15)$$

又因由式(1)可得获得负载最多的群的负载为

$$\alpha_1 = 1 / (1 + \sum_{i=2}^k \prod_{j=2}^i g_j), \quad (16)$$

其他 $k - 1$ 个群所获得的负载分别为

$$\alpha_i = \prod_{j=2}^i g_j / (1 + \sum_{i=2}^k \prod_{j=2}^i g_j). \quad (17)$$

由于SINK节点分配给第一个群的负载是最多的, 第一个群完成群内任务, 并由群首将群内节点采集的数据融合后传送到SINK节点的时间, 也就是总任务的完成时间. 此时可得到整个应用的最小响应时间为

$$T_f = t_1 + (w_1 T_{cp} + \varphi_1 z_1 T_{cm}) / (1 + \sum_{i=2}^k \prod_{j=2}^i g_j). \quad (18)$$

在同构网络环境下, 各个群及群中的节点参数相同, 由式(16)可得

$$\alpha_1(1 + g + g^2 + g^3 + \dots + g^k) = 1, \quad (19)$$

其中:

$$g = (C + w T_{cp}) / (C + w T_{cp} + \varphi z T_{cm}),$$

$$C = (y T_{ms} + z T_{cm})(1 - s) / (1 - s^n),$$

$$s = y T_{ms} / (y T_{ms} + z T_{cm}).$$

式(19)可以简化为

$$\alpha_1 = (1 - g) / (1 - g^k). \quad (20)$$

由式(15)可知其他 $k - 1$ 个群得到的负载分别为

$$\alpha_i = \alpha_1 g^{i-1}. \quad (21)$$

由式(20)可得到在同构网络前提下, 整个应用的响应时间为

$$T_f = (C + w T_{cp} + \varphi z T_{cm})(1 - g) / (1 - g^k). \quad (22)$$

当网络密集部署时, 由当前的各种分群算法, 密度越大, 分的群越多. 当 k 趋向于 ∞ 时,

$$T_f = \varphi z T_{cm}. \quad (23)$$

证 当 $k \rightarrow \infty, 1 - g^k \rightarrow 1$ 时,

$$T_f = (C + w T_{cp} + \varphi z T_{cm})(1 - g).$$

由式(19)中 $g = (C + w T_{cp}) / (C + w T_{cp} + \varphi z T_{cm})$, 将其带入上式, 可得 $T_f = \varphi z T_{cm}$.

针对于任务规模加大, 群首存储资源有限的问题, 给出了以下任务调度的线性规划模型:

$$\min T_f$$

$$\text{s.t. } t_i + \alpha_i w_i T_{cp} + \sum_{j=1}^i \varphi_j \alpha_j z_j T_{cm} \leq T_f,$$

$$\alpha_i \leq B_i, \quad \sum_{i=1}^k \alpha_i = 1, \quad \alpha_i \geq 0, \quad (24)$$

其中: t_i 如图3所示, 表示每个群的群内处理时间,

B_i 表示群首 C_i 的存储能力.

式(24)表示线性规划模型的约束条件部分, 第 1 个条件表示每个群首完成数据融合后, 由于和 SINK 之间共享信道, 群首必须相继向 SINK 传送结果; 第 2 个表示每个群首信息存储能力有限, 在群首进行操作的数据总大小不能超过存储空间限制; 第 3 个确保总任务被所有群执行完毕; 第 4 个保证任务在整个网络上执行.

从式中可以看出该线性规划模型有 k 个变量, $3k + 1$ 个约束条件, 其解为 k 维空间的一点^[16]. 由

约束条件可知可行域为一凸多面体, 可知最优总能在可行域(凸多面体)的有限个顶点中找到. 而最优的位置取决于问题的实际情况, 所以在资源受限的情况下, α_i 不容易得到具体的解析解.

证毕.

4.2 同时开始采集数据,同时完成报告数据 (Simultaneous measurement start, simultaneous reporting termination)

同时开始采集数据,同时完成报告数据模型如图4所示.

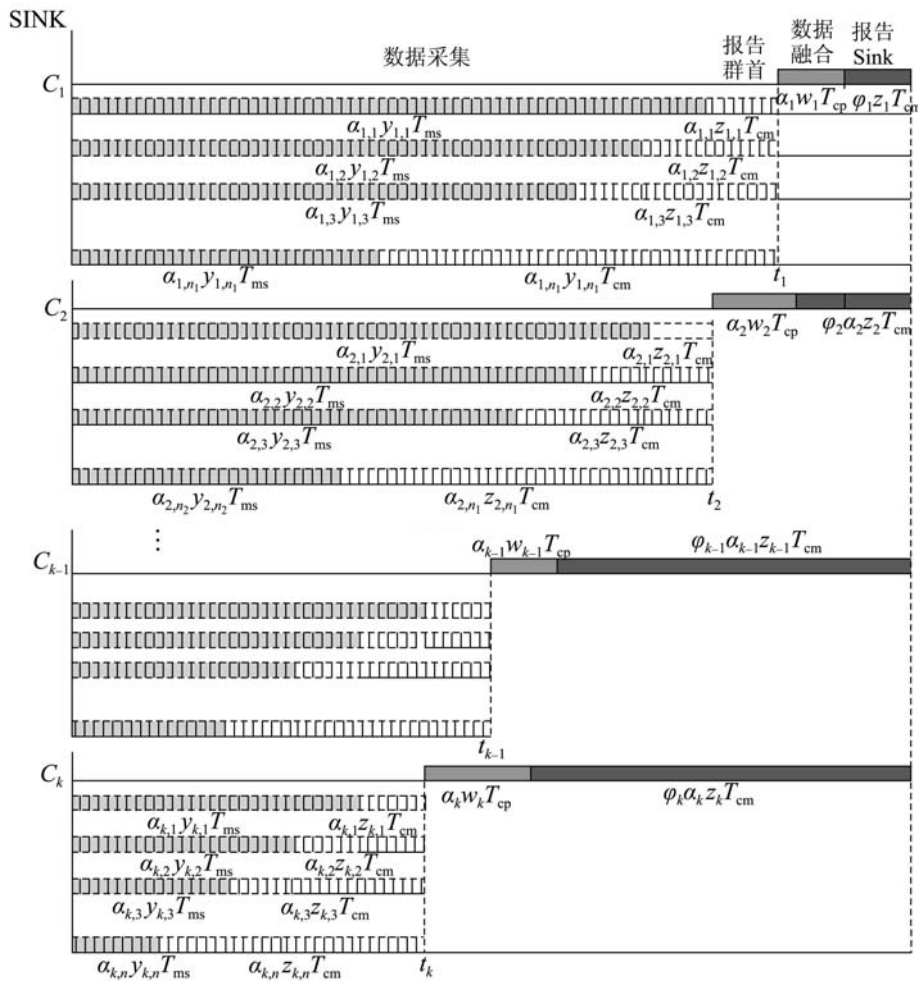


图 4 同时开始采集数据,同时完成数据报告情形的时序图

Fig. 4 Timing diagram of simultaneous measurement start, simultaneous reporting termination strategy

对于群 i 来说, 群内节点完成相应的数据采集和报告群首的时间有如下等式:

$$\begin{aligned} \alpha_{i,j} y_{i,j} T_{ms} + \alpha_{i,j} z_{i,j} T_{cm} &= \\ \alpha_{i,k} y_{i,k} T_{ms} + \alpha_{i,k} z_{i,k} T_{cm}. \end{aligned} \quad (25)$$

由此可得

$$\alpha_{i,j} r_{i,j} = \alpha_{i,k} r_{i,k}, \quad (26)$$

其中: $r_{i,j} = y_{i,j} T_{ms} + z_{i,j} T_{cm}$, $r_{i,k} = y_{i,k} T_{ms} + z_{i,k} T_{cm}$.

由式(2)(26)可得群中每个节点应该获得的负载比例为

$$\alpha_{i,j} = \alpha_i \frac{1}{r_{i,j}} / \sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{r_{i,j}}. \quad (27)$$

由图4及式(27)可知第 i 个群完成其采集任务和报告任务的时间为

$$t_i = \alpha_i (y_{i,j} T_{ms} + z_{i,j} T_{cm}) \frac{1}{r_{i,j}} / \sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{r_{i,j}}. \quad (28)$$

由于式(25),不失一般性,选择群中第一个节点进行考察,可得

$$t_i = \alpha_i(y_{i,1}T_{ms} + z_{i,1}T_{cm}) \frac{1}{r_{i,1}} / \sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{r_{i,j}}. \quad (29)$$

由图4可看出各群首收集群内节点报告的数据并做数据融合,报告SINK节点的时间满足下式:

$$\begin{aligned} t_i + \alpha_i w_i T_{cp} + \varphi_i \alpha_i z_i T_{cm} = \\ t_{i+1} + \alpha_{i+1} w_{i+1} T_{cp} + \varphi_{i+1} \alpha_{i+1} z_{i+1} T_{cm}. \end{aligned} \quad (30)$$

在式(29)中,令

$$t_i = D_i \alpha_i, \quad (31)$$

$$\text{其中 } D_i = (y_{i,1}T_{ms} + z_{i,1}T_{cm}) \frac{1}{r_{i,1}} / \sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{r_{i,j}}.$$

由式(30)可得

$$\begin{aligned} D_i \alpha_i + \alpha_i w_i T_{cp} + \varphi_i \alpha_i z_i T_{cm} = \\ D_{i+1} \alpha_{i+1} + \alpha_{i+1} w_{i+1} T_{cp} + \varphi_{i+1} \alpha_{i+1} z_{i+1} T_{cm}. \end{aligned} \quad (32)$$

在式(32)中令

$$h_i = D_i + w_i T_{cp} + \varphi_i z_i T_{cm}, \quad (33)$$

可得

$$\alpha_j h_j = \alpha_k h_k. \quad (34)$$

由式(1)(34),可得到每个群应得到负载的通用表达式为

$$\alpha_i = \frac{1}{h_i} / \sum_{i=1}^k \frac{1}{h_i}. \quad (35)$$

此时可得到整个应用的响应时间为

$$T_f = T_i = t_i + (w_i T_{cp} + \varphi_i z_i T_{cm}) \frac{1}{h_i} / \sum_{i=1}^k \frac{1}{h_i}. \quad (36)$$

从以上各式可以看出,在同构网络环境下,各个群及群中节点的参数相同,每个群有 n 个节点,则SINK节点可平均分配负载给各个群,每个群得到的负载为

$$\alpha_i = 1/k. \quad (37)$$

可得到在同构网络前提下,整个任务的最小完成耗时为

$$T_f = (D + wT_{cp} + \varphi zT_{cm})/k, \quad (38)$$

其中 $D = (yT_{ms} + zT_{cm})/n$.

当网络密集部署时,由当前的各种分群算法,密度越大,分的群越多.由式(38)可知,当 k 趋向于 ∞ 时, T_f 趋向于0.

针对于任务规模加大、群首存储资源有限的问题,给出了以下任务调度的线性规划模型:

$$\begin{aligned} \min T_f, \\ \text{s.t. } t_i + \alpha_i w_i T_{cp} + \varphi_i \alpha_i z_i T_{cm} \leq T_f, \\ \alpha_i \leq B_i, \sum_{i=1}^k \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0. \end{aligned} \quad (39)$$

线性规划模型(39)的可行解分析和4.1小节最后部分相似.

5 能量消耗模型(Energy consumption model)

在本节,提出了分群结构的无线传感器网络能量消耗模型.采用基于LEACH协议^[17]的一阶无线电模型来构造能量消耗公式.LEACH是无线传感器网络中最早提出的分群协议,它的成群思想贯穿于其后发展出的很多分群协议中,如TEEN,DAEA等,它构造的是群内单跳网络.LEACH协议的一阶无线电模型基于以下假设:1)网络中所有节点完全相同;2)无线电信号在各个方向上能量消耗相同;3)管理中心节点是相对稳定的,并且离整个网络较远.

定义网络中节点采集、融合、报告、接收一单位数据所消耗的能量分别为: e_s, e_p, e_{tx}, e_{rx} ;报告和发送节点间的距离均为 d .

根据一阶无线电模型,可得第 i 个群中第 j 个节点的能量消耗为

$$E_{i,j} = \alpha_{i,j}(e_s + e_{tx} d^2). \quad (40)$$

群首 C_i 的能量消耗为

$$E_i = \alpha_i(e_{rx} + e_p + \varphi_i e_{tx} d^2). \quad (41)$$

SINK节点的能量消耗为

$$E_{SINK} = \sum_{i=1}^k \varphi_i \alpha_i e_{tx}. \quad (42)$$

6 仿真分析(Simulation and analysis)

在以上章节,给出了最短时间里完成任务的条件下总任务完成时间的封闭表达式和各个节点的能耗公式.在本章,笔者对采集速度、通信速度、数据融合速度和信息效用常量这4个系统参数在同构网络环境下,对总任务完成时间和能量消耗的影响进行了仿真分析.

在仿真中,能量消耗参数如下所示:在一单位距离上,报告一单位数据所消耗的能量为 $e_{tx} = 200 \text{ nJ}$;接收一单位数据所消耗的能量为 $e_{rx} = 200 \text{ nJ}$;采集一单位数据所消耗的能量为 $e_s = 100 \text{ nJ}$;融合一单位数据所消耗的能量为 $e_p = 30 \text{ nJ}$;

报告、接收节点间的距离均为 $d = 100\text{ m}$, 每个群里有30个节点. 在仿真中令 $T_{ms} = T_{cm} = T_{cp} = 1$.

因为在无线传感器网络中, SINK节点一般没有能量限制, 而且在现有的无线传感器网络分群协议中, 当群稳定后, 群首节点相对来说也是能量有保障的, 所以在本文中, 只考察群内节点的能耗情况. 从4.1和4.2小节可知, 网络中第一个群所获得的负载最多. 不失一般性, 本文以第一个群中的节点来考察群内各个节点的能耗情况. 由于可分负载理论在分配负载时的特性, 使分配的负载随着分配的顺序依次变小, 而在可分负载理论中, 所讨论的计算消耗、能量消耗、带宽消耗等均假设和负载的大小成线性关系. 所以节点的能耗随着负载分配的顺序逐渐减小.

仿真结果如图5~9所示. 因为群数目增加, 整个网络中节点的数目就会增加. 网络中协作完成任务的机会也就会更多, 但用于报告的开销又会增大. 分别考察参数 y, z, w, φ 随着群的数目的增加, 对系统总任务完成时间的影响, 和随着负载分配的次序对群内节点能耗的影响.

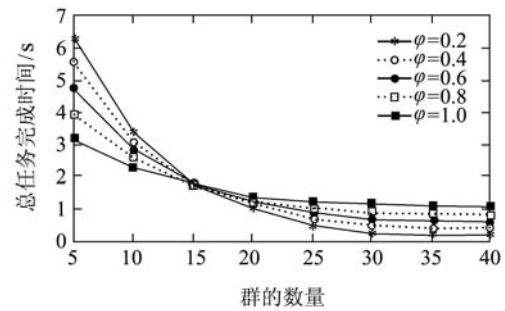
6.1 同时开始采集数据, 相继报告数据 (Simultaneous measurement start, sequential reporting)

I) 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. 如图5(a)所示, 随着群数目的增大, 系统完成时间逐渐减小. 信息效用常量越大, 其系统完成时间减小的趋势越缓. 如式(23)所示, 当群数目到达一定数目时, 系统完成时间趋向于 $\varphi z T_{cm}$. 如图6(a)所示, φ 的选取对于群内各节点的能耗情况几乎没有影响. 随着群内负载的分配次序, 各节点能耗递减.

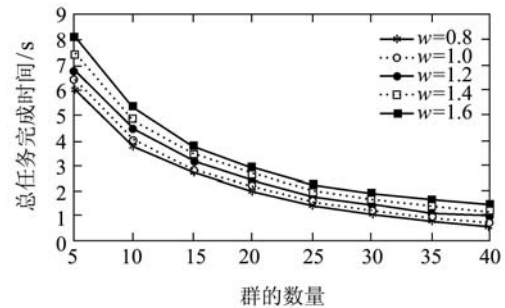
II) φ, y, z , 固定, 令 $y = z = 1.0$, $\varphi = 0.5$, w 分别取: 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6. 如图5(b)所示, 随着网络中群数目的增加, 系统总任务完成时间会减少. 群首进行数据融合的速度越大, 系统完成时间减小的趋势越缓. 如图6(b)所示, 群首进行数据融合的速度越大, 群内节点的能耗越小.

III) 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. 如图5(c)所示, 由于数据采集只占据了总任务完成时间的很小一部分, 所以传感器节点的数据采集速度的增大, 对系统完成时间的影响非常小. 如图6(c)所示, 群内节点采集数据的速度越大, 群首可将负载更加均衡地分配给各个节点, 所以各个节点的能耗越小.

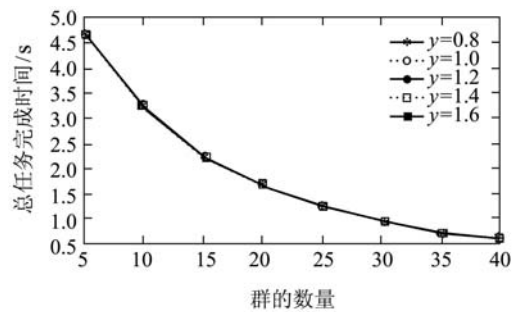
IV) φ, y, w 固定, 令 $w = y = 1.0$, $\varphi = 0.5$, z 分别取: 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6. 如图5(d)所示, 随着群数目的增大, 系统的完成时间会减少. 节点间的通信速度越大, 系统完成时间减小的趋势越缓. 如式(23)所示, 当群数目增大到一定数目时, 系统完成时间收敛向 $\varphi z T_{cm}$. 如图6(d)所示, 节点间的通信速度越大, 群内节点的能耗越小.



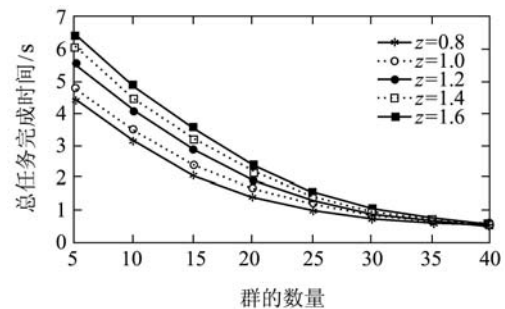
(a) φ 的影响



(b) w 的影响



(c) y 的影响



(d) z 的影响

图5 各参数对同时开始数据采集, 相继报告数据模型完成任务耗时的影响

Fig. 5 Impact of these four parameters on finish time under measurement start, sequential reporting model

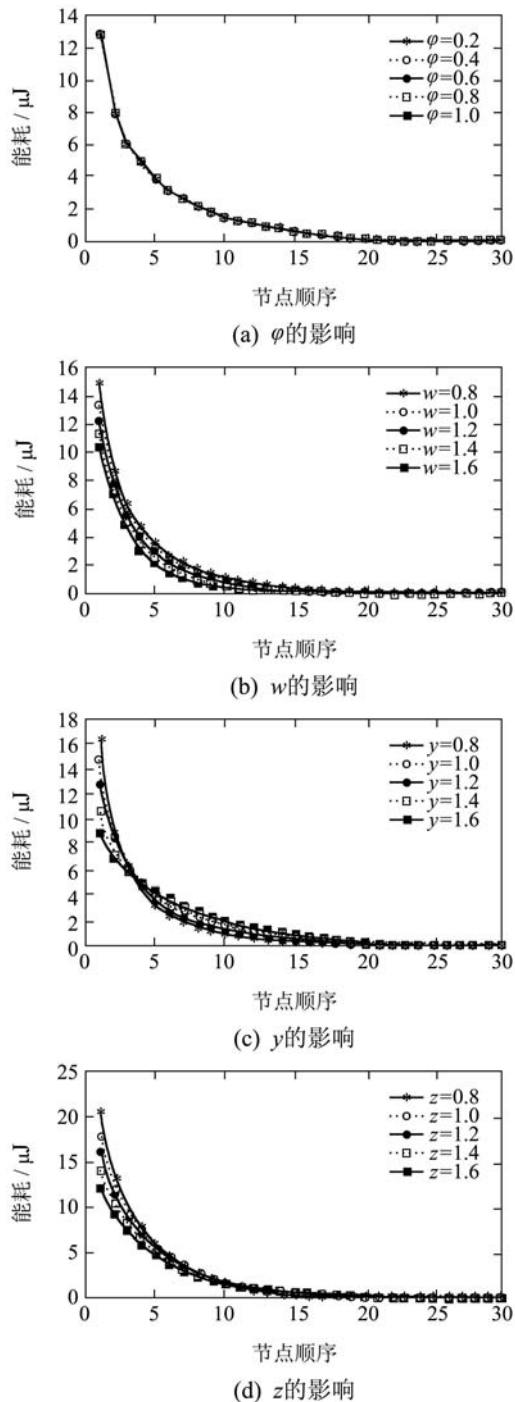


图6 各参数对同时开始数据采集, 相继报告数据模型群内各节点能耗的影响

Fig. 6 Impact of these four parameters on energy consumption of each intra-cluster nodes under measurement start, sequential reporting model

为了对异构网络环境下的调度算法进行仿真, 群内节点的采集速度和节点间的通信速度取 $[0.8 \sim 1.2]$ 之间的随机数, 仿真中信息效用常量固定为0.5, 群首节点融合速度为1.0. 通过5次试验来分析异构网络环境下调度算法的性能, 图7(a)反映了在异构网络环境下, 随着群数目的增加, 随机的节点采集速度和通信速度对总任务完成时间和的

影响, 图7(b)反映了随着群内任务分配的次序, 随机的采集速度和通信速度对群内节点能耗的影响. 对比图5, 图6, 可以看出采集速度对总任务完成时间和能耗的影响比通信速度的影响小, 随着群数目的增大和群内任务分配次序, 总任务完成时间和能耗均是递减.

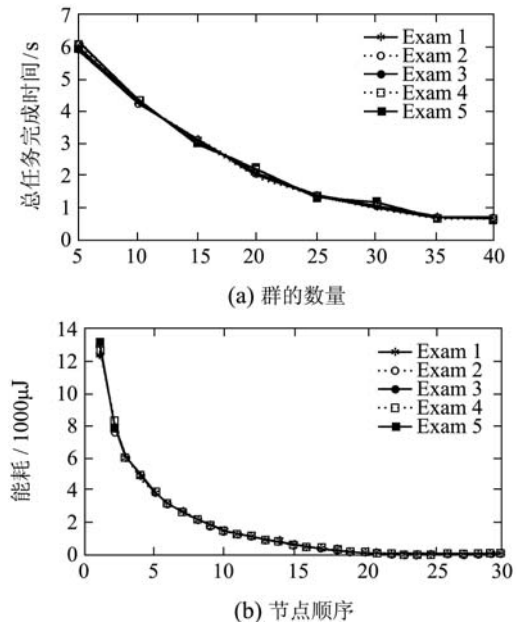


图7 随机采集速度与带宽对总任务完成时间和能耗的影响

Fig. 7 Impact of random parameters on finish time and energy-consuming

6.2 同时开始采集数据, 同时完成报告数据 (Simultaneous measurement start, simultaneous reporting termination)

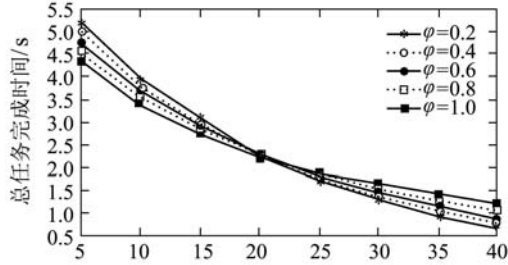
I) y, z, w 固定, 令 $w = y = z = 1.0$, φ 分别取: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0. 如图8(a)所示, 随着群数目的增大, 系统完成时间逐渐减小. 信息效用常量越大, 其系统完成时间减小的趋势越缓. 如图9(a)所示, φ 的选取对于群内各节点的能耗情况几乎没有影响. 随着群内负载的分配次序, 各节点能耗递减.

II) φ, y, z , 固定, 令 $y = z = 1.0$, $\varphi = 0.5$, 分 w 别取: 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6. 如图8(b)所示, 随着网络中群数目的增加, 系统总任务完成时间会减少. 群首进行数据融合的速度越大, 系统完成时间减小的趋势越缓. 如图9(b)所示, 群首进行数据融合的速度越大, 群内节点的能耗越小.

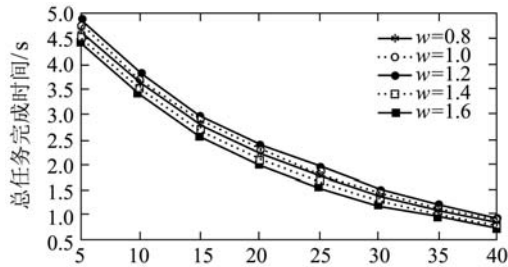
III) φ, z, w 固定, 令 $w = z = 1.0$, $\varphi = 0.5$, y 分别取: 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6. 如图8(c)所示, 由于数据采集只占据了总任务完成时间的很小一部分, 所以传感器节点的数据采集速度的增大, 对系统完成时间的影响非常小. 如图9(c)所示, 群内节点

采集数据的速度越大, 群首可将负载更加均衡地分配给各个节点, 所以各个节点的能耗越小.

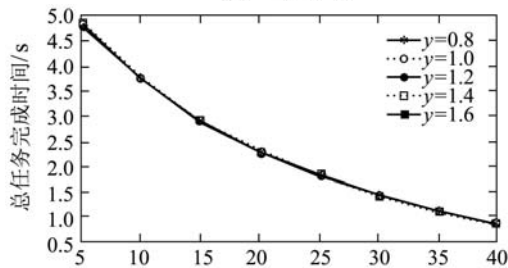
IV) φ, y, w 固定, 令 $w = y = 1.0, \varphi = 0.5, z$ 分别取: 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6. 如图8(d)所示, 随着群数目的增大, 系统的完成时间会减少. 节点间的通信速度越大, 系统完成时间减小的趋势越缓. 如图9(d)所示, 节点间的通信速度越大, 群内节点的能耗越小.



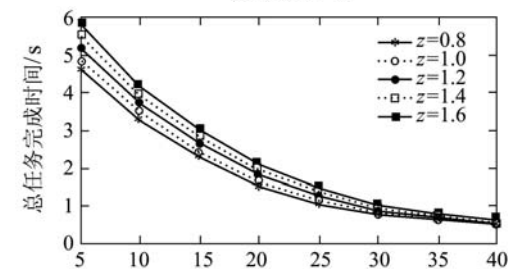
(a) φ 的影响



(b) w 的影响



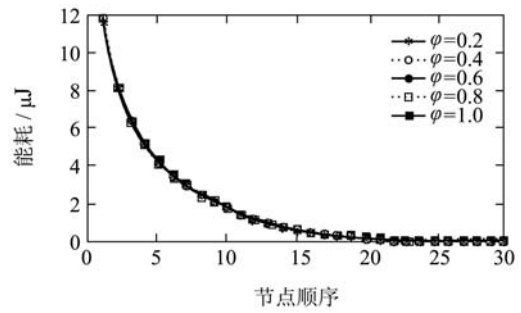
(c) y 的影响



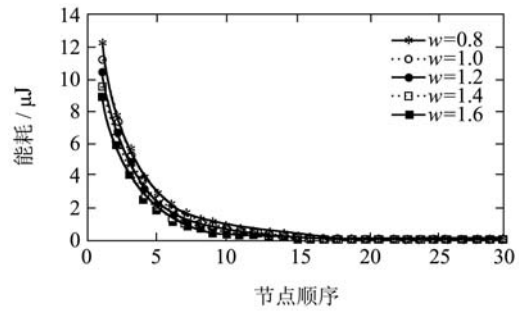
(d) z 的影响

图 8 各参数对同时开始采集数据, 同时完成报告数据模型完成任务耗时的影响

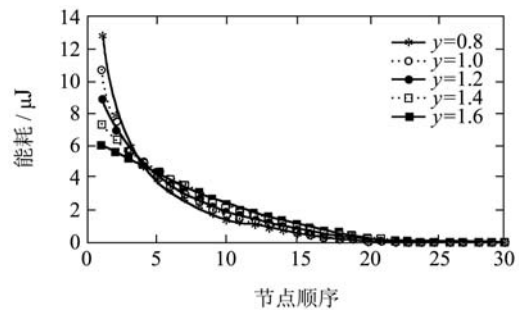
Fig. 8 Impact of these four parameters on finish time under simultaneous measurement start, simultaneous reporting termination



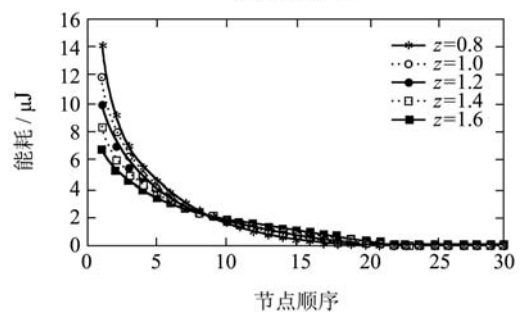
(a) φ 的影响



(b) w 的影响



(c) y 的影响



(d) z 的影响

图 9 各参数对同时开始采集数据, 同时完成报告数据模型群内各节点能耗的影响

Fig. 9 Impact of these four parameters on energy consumption of each intra-cluster nodes under simultaneous measurement start, simultaneous reporting termination

采用上一小节对异构网络环境下的调度算法进行仿真的方式, 进行再同时完成报考数据模型的异构环境仿真. 仿真参数与上一小节的随机参数相同. 通过5次试验来分析异构网络环境下调度算法的性能, 图10(a)反映了在异构网络环境下, 随着群数目的增加, 随机的节点采集速度和通信速

度对总任务完成时间和的影响,图10(b)反映了随着群内任务分配的次序,随机的采集速度和通信速度对群内节点能耗的影响.

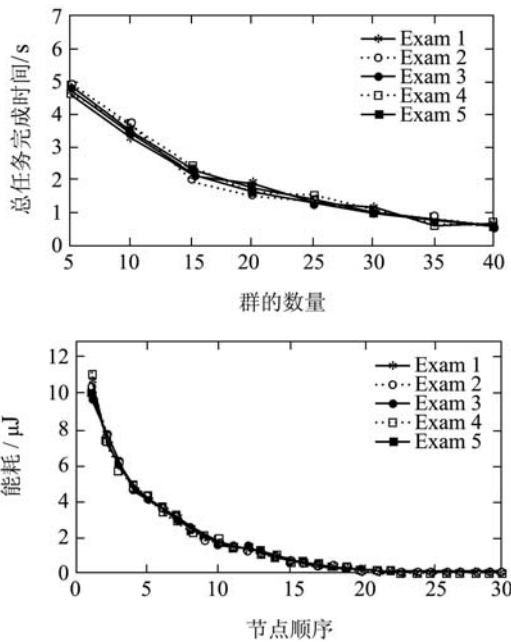


图 10 随机采集速度与带宽对总任务完成时间和能耗的影响

Fig. 10 Impact of random parameters on finish time and energy-consuming

6.3 两种采集模式的耗时耗能对比(Contrast of the two measurement mode on time-consuming and energy-consuming)

最后,对本文中讨论的两种典型的数据采集/报告模型通过仿真做了总任务完成耗时和群内节点能耗的对比.在仿真中,令 $w = y = z = 1.0$, $\varphi = 0.5$.在图11中,可以看出同时数据采集,同时完成数据报告模型(SRT)在相同群数目的条件下,完成总任务的时间要比同时数据采集,相继数据报告模型(SR)小,群内节点能耗更加均衡,从而网络寿命会更长.这是因为在同时数据采集,同时完成数据报告模式下,负载可以更均衡地分配给网络中各个节点.

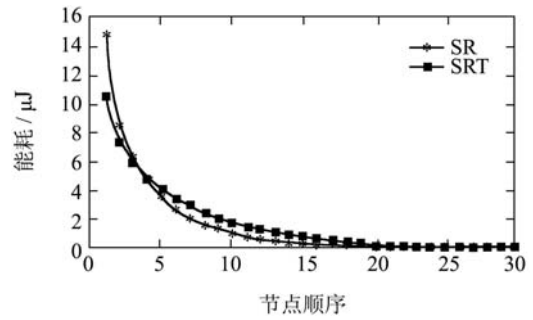
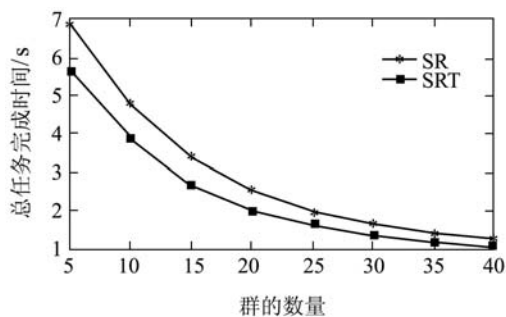


图 11 两种采集模式完成任务耗时耗能的对比

Fig. 11 Time-consuming and energy-consuming comparing of these two kinds of acquisition mode

6.4 两种采集模式在不同任务比例条件下的耗时耗能对比(Contrast of the two measurement mode on time-consuming and energy-consuming under a variety of tasks)

为了证明WDTA算法可以有效减少任务执行的耗时耗能,在不同总任务比例条件下对总任务完成时间及系统总能耗(节点、群首、SINK节点能耗之和)做了仿真分析,在仿真中设置 $w = y = z = 1.0$, $\varphi = 0.5$.当总任务数为1~5,总任务完成时间和系统总能耗的对比如图12所示.在图12中,可以看出同时数据采集,同时完成数据报告模型(SRT)在不同的总任务量条件下,完成总任务的时间要比同时数据采集,相继数据报告模型(SR)小.两种模式下,任务完成时间都是近乎线性的增长.系统总能耗也由于SRT的采集和通信模式可以将负载更优地分配给网络中各个节点而更加均衡.

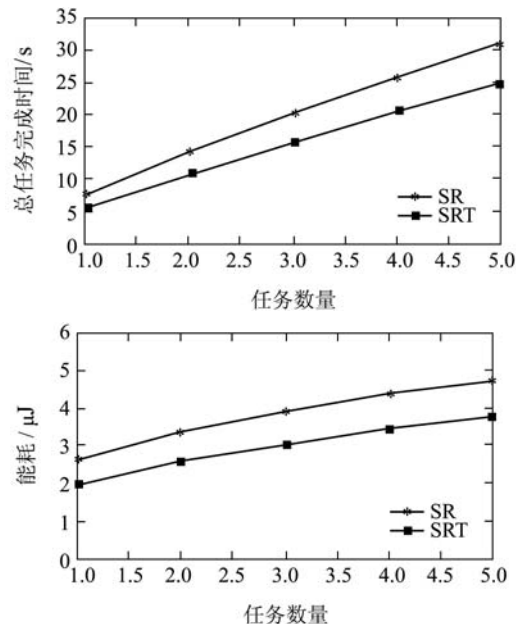


图 12 两种采集模式完成任务耗时耗能的对比

Fig. 12 Time-consuming and energy-consuming comparing of these two kinds of acquisition mode

7 结论(Conclusion)

由于无线传感器网络中的节点带有有限的能量, 所以应该尽可能快的完成系统任务. 可分负载理论在无线传感器网络上的应用为其任务调度提供了一个有效的解决方案. 与其他无线传感器网络任务调度问题的启发式解决方案不同, 该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. 本文提出了分群结构下, 基于可分负载理论的无线传感器网络任务调度算法, 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.

随着无线传感器网络技术和泛在网络的逐步发展, 可分负载理论对这种复杂网络的建模与扩展也需要进一步研究及验证. 此外, 目前对可分负载理论在无线传感器网络任务调度的验证仍停留在仿真试验阶段, 缺乏大型的、实际的应用来证明它的真正潜力, 因此可分负载理论在实际无线传感器网络的应用将是下一步研究的重要方向.

参考文献(References):

- [1] ZENG Z W, LIU A F, LI D, et al. A highly efficient DAG task scheduling algorithm for wireless sensor networks[C] // *Proceedings of the International Conference for Young Computer Scientists*. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2008: 570 – 575.
- [2] YUAN T, EKICI E, OZGUNER F. Energy-constrained task mapping and scheduling in wireless sensor networks[C] // *Proceedings of the International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems*. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2005: 211 – 218.
- [3] LIN J Y, XIAO W D, LEWIS F L, et al. Energy-efficient distributed adaptive multisensor scheduling for target tracking in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(6): 1886 – 1896.
- [4] WANG Q, ZHU Y Y, CHENG L. Reprogramming wireless sensor networks: challenges and approaches[J]. *IEEE Network*, 2006, 20(3): 48 – 55.
- [5] 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.
- [6] ROBERTAZZI T G. Ten reasons to use divisible load theory[J]. *Computer*, 2003, 36(5): 63 – 68.
- [7] JIA J X, 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.
- [8] 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.
- [9] LIU H Y, YUAN X J, MOGES M. An efficient task scheduling method for improved network delay in distributed sensor networks[C] // *Proceedings of the International Conference on Testbeds and Research Infra-structure for the Development of Networks and Communities*. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2007: 1 – 8.
- [10] LIU H Y, SHEN J, YUAN X J, et al. Performance analysis of data aggregation in wireless sensor mesh networks[C] // *Proceedings of the International Conference on Engineering, Science, Construction and Operations in Challenging Environments*. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2008: 1 – 8.
- [11] CHOI K, ROBERTAZZI T G. Divisible load scheduling in wireless sensor networks with information utility[C] // *Proceedings of the International Performance Computing and Communications Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 9 – 17.
- [12] LI X L, LIU X X, KANG H. Sensing workload scheduling in sensor networks using divisible load theory[C] // *Proceedings of the Global Telecommunications Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 785–789.
- [13] CHOI K, ROBERTAZZI T G. *Divisible load scheduling in clustered wireless sensor networks*[D]. Stony Brook, NY: Stony Brook University, 2009.
- [14] 张细政, 王耀南. 一种新的传感器网络混合广播调度方法[J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(3): 342 – 345.
(ZHANG Xizheng, WANG Yaonan. A new hybrid broadcast scheduling scheme for wireless sensor network[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(3): 342 – 345.)
- [15] LI H, JIANG S, WEI G. Information-accuracy-aware jointly sensing nodes selection in wireless sensor networks[C] // *Proceedings of International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks*. Heidelberg: Springer, 2006: 736 – 747.
- [16] 魏权龄, 闫洪. 广义最优化理论和模型[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [17] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660 – 670.

作者简介:

代亮 (1981—), 博士, 讲师, 主要研究领域为无线传感器网络、Ad hoc网络, E-mail: ldai1981@gmail.com;

沈中 (1969—), 男, 博士, 讲师, 主要研究领域为无线Ad hoc网络管理、拓扑控制和维护, E-mail: zhshen@mail.xidian.edu.cn;

常义林 (1944—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为网络管理和多媒体通信, E-mail: ylchang@xidian.edu.cn;

张颖 (1982—), 女, 博士研究生, 主要研究领域为无线传感器网络、无线Ad hoc网络, E-mail: yingzhang@mail.xidian.edu.cn;

闫中江 (1983—), 男, 博士研究生, 主要研究领域为无线传感器网络、无线Ad hoc网络, E-mail: zhjyan@xidian.edu.cn.