

一种基于休眠调度策略的无线传感网络分簇协议

王慧斌, 钟云龙, 张家华, 严锡君, 徐立中
(河海大学 计算机与信息学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 文中设计了一种基于休眠调度策略的无线传感网络分簇协议. 该协议计算出簇首最佳比例和网络瞬时剩余能量, 采用固定簇首数目与剩余能量估计的方法对网络进行分簇, 在成簇后的数据传送阶段采用蚁群算法计算出节点的唤醒概率, 最后通过仿真实验与 LEACH、SEP 协议进行了比较. 实验结果表明: 该协议在对目标保持较好探测效果的前提下能更均匀的消耗网络的能量, 从而延长网络的生命周期.

关键词: 无线传感器网络; 蚁群算法; 分簇; 休眠调度; 网络生命周期

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)08-0226-04

Based on Sleep Scheduling for Wireless Sensor Networks Clustering Protocol

WANG Hui-bin, ZHONG Yun-long, ZHANG Jia-hua, YAN Xi-jun, XU Li-zhong

(College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This article discusses and solves the defects of the LEACH clustering algorithm, such as the number of Cluster head is unstable, and network energy consumption is unbalanced. The method of ant colony pheromone update on the environment is used in node sleep scheduling of WSN, through the calculation of average energy within the network, this paper presents an ant scheduling algorithm based on energy preference for sensor networks. Simulation results on target tracking experiments show that the proposed algorithm maintains superior detection ability while taking uniform energy consumption and extending the network life cycle.

Key words: wireless sensor networks; ant colony algorithm; clustering; sleep scheduling; network life cycle

1 引言

无线传感器网络是一种新型的信息获取、处理技术. 它具有单个节点能量有限、节点分布密度大、通信网络自组织等特点. 基于无线传感器网络技术可以更为灵活地获得广泛和准确的信息, 因而具有非常大的应用前景. 然而, 由于受到节点和网络资源的限制, 如何有效利用资源问题始终是无线传感器网络研究的重点.

将传感器网络中的节点分簇, 是路由算法中比较有效的一种节能策略. 通过对节点的休眠控制也可以实现传感器网络的节能. Wendi B. Heinzelman

等人设计的 LEACH^[1]分簇协议中将网络的操作时间分成许多轮, 因簇首消耗的能量较多, 设计在每轮操作中节点以一定的成簇概率竞选簇首, 以此平衡网络中各节点的能耗消耗. 但是由于忽略了网络中簇首节点的分布情况, 节点间通讯距离的不同, 以及选择低能量节点为簇首导致了能量消耗的不平衡, 加速网络能量的消耗. 文献[2-4]分别从簇首选取, 以及网络中节点能量消耗的不同对 LEACH 进行了改进; 而在成簇后的稳定阶段, LEACH 采用的是 TDMA 方式, 即固定的休眠/唤醒方式, 文献[5]采用动态的休眠方式, 使得不必要唤醒的节点尽量处于休眠状态, 起到了较好的节能的效果.

文中在以上研究成果的基础上设计了新的分簇路由协议。

2 协议设计思路

2.1 基本思路

文中所设计的分簇路由协议大致可分为两个阶段:簇的建立和数据传输阶段。在簇首的建立阶段,采用了与 LEACH 协议类似的簇首选举方式,将网络的操作时间分成许多轮在每一轮中选取 $p \cdot N$ 个簇首节点,其中 p 是成簇比例。首先计算在每轮中能量消耗最少的簇首比例,并以此比例作为网络的簇首比例,并在选举过程中加以固定,以达到均衡消耗的目的,并将节点剩余能量与估计的网络平均能量相比较,避免了节点剩余能量低于网络平均能量的节点成为簇首,而加剧网络失效的可能;在数据传输阶段,协议将蚁群信息素扩散的方式用于传感器网络中节点间的协同,即通过将传感器节点间信息素的更新计算出节点的唤醒概率,以此唤醒概率动态唤醒节点从而达到节约能耗的效果。

2.2 基本假设

文中将无线传感器网络每个节点装置类比成蚁群中蚂蚁,下文将“蚂蚁节点”等价于“传感器节点”,它有以下特征:

(1) 所有传感器节点位置固定,并且所有节点是同构的,并具备数据融合功能;

(2) 传感器节点具有一定的感知能力,并且随着感知结果影响着自身信息素的大小;

(3) 相邻的传感器节点之间分享感知结果,从而影响相邻节点的信息素的大小;

(4) 传感器节点总是随着自身信息素的大小使得自己处在休眠和唤醒之间变化;

(5) 如果没有目标因素的影响,传感器节点的信息素会随着时间的流逝而消减。

假设 N 个传感器节点随机均匀部署在 $M \times M$ 的方形区域内,并且基站位于区域的中心位置 $(M/2, M/2)$,传感器节点在部署区域内的探测感知都有一定的感知半径,即每个传感器节点只能探测到一定半径范围内的目标,因此将部署空间划分为单元格,每个单元格都可被部署在区域内的一部分传感器所探测感知,即是在传感器节点的感知半径范围之内,并假设 R_s 为传感器节点的感知半径, R 为节点单跳邻居的通信距离, m 为目标 M 的位置向量。

3 协议具体设计

3.1 簇的建立阶段协议设计

3.1.1 最佳簇首比例的确定

假设簇首占传感器节点总数的比率为 p ,簇首与基站的平均距离为 d_{CHtoBS} ,簇内节点与各簇首间平均距离为 d_{NDtoCH} ,为简化问题,每个簇的成员节点在每一轮中向簇头节点发送 l 比特的消息,并且簇首与基站通信距离稍远,采用多路径衰减;而簇内节点相对比较近才用自由空间模型,于是网络在每一轮中消耗的总能量为,因此在一轮时间内所有簇首都向基站发送 l 比特数据时消耗的总能量为 $E_{CHtoBS}(l)$,所有簇内节点向簇首发送 l 比特数据时消耗的总能量为 $E_{NDtoCH}(l)$ 。

$$\begin{cases} E_{CHtoBS}(l) = Nl(2E_{elec} + pk_1\epsilon_{tr}(d_{CHtoBS})^4) \\ E_{NDtoCH}(l) = Nl(2E_{elec} + k_2\epsilon_{fs}(1-p)(d_{NDtoCH})^2) \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可得传感器网络在一轮中消耗的总能量为式(2)

$$E_{round} = Nl(2E_{elec} + E_{da} + p\epsilon_{tr}(d_{CHtoBS})^4 + (1-p)\epsilon_{fs}(d_{NDtoCH})^2) \quad (2)$$

$$d_{CHtoBS} = 0.765 \frac{M}{2}, d_{NDtoCH} = \frac{M}{\sqrt{2\pi pN}} \quad (3)$$

由式(2)、(3)联立后对 E_{round} 关于变量 p 求偏导得:

$$\frac{\partial E_{round}}{\partial p} = Nl \left(\epsilon_{tr}(d_{CHtoBS})^4 - \frac{\epsilon_{fs}M^2}{2\pi p^2} \right) \quad (4)$$

式(4)表示传感器节点在一轮中消耗的平均能量与簇首比例之间的关系,令该函数的偏导数等于0,可以求得一轮消耗能量最少时的簇首比例 P :

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{tr}}} \frac{M^2}{(d_{CHtoBS})^4} \quad (5)$$

因此当簇首个数为 P 时,网络在一轮簇首选举的能量消耗为最少。

3.1.2 能量均衡的簇首选举算法

由上节可知,LEACH中簇首个数的随机变化将导致网络消耗的能量变大,由式(5)可知簇首个数与节点总数的比值在3%~5%时网络消耗的能量最少,因为过多节点当选为簇首将导致节点所在簇的距离之和并没有明显减少,而簇首还要给距离相对教远的基站传送簇内节点采集的数据,而过少的节点当选簇首也会导致节点传送总距离的增加,从而导致节点通信能耗指数级的增加。

为了尽可能地延长网络的寿命,可假设在整个

网络生命周期内,网络按照固定的速率消耗能量,即能量均衡地分布在传感器网络整个生命周期内,故可假设传感器节点在每轮消耗相同的能量,设网络的生命期为 R 轮,那么网络每轮消耗的能量为: $E_{\text{round}} = NE_0/R$,于是当进行到第 r 轮时网络的平均能量可以表示为

$$E_{\text{ave}} = E_0(1 - \frac{r}{R}) \quad (6)$$

因此当网络中出现节点死亡(节点能量耗尽)前将节点个数固定,分别给每个传感器节点进行编号(其中基站节点不需要分配): $\text{NodeID} = 0, 1, \dots, i, \dots, N-1$, 这样每个节点在网络中都有唯一的标记,在第 r 轮节点采用式(7)作为判断自身能否成为簇首的阈值。

$$T_{\text{threshold}} = \text{mod} \{(\text{mod}(r, N/k))k, N\} \quad (7)$$

式中, mod 是取模运算, k 为选取的簇首个数。

如节点编号小于阈值则该节点当选为本轮簇首,这样就可保证每一轮的簇首个数为 $k = Np$,但当网络中出现节点死亡后不能保证簇首个数持续稳定,考虑到簇首选择过程中每个节点轮流成为簇首,能量消耗相对比较均匀,当出现节点死亡后将阈值选择变为 LEACH 算法的阈值选择方式,即节点 S_i 都由(8)来决定节点是否成为簇首

$$P_{\text{threshold}} = \begin{cases} \frac{k}{N - k \cdot \text{mod}(r, N/k)}, & \text{if } (S_i \in N_{ch}) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

式中, r 表示当前的轮数, N_{ch} 表示在最近 $\text{mod}(r, 1/p)$ 轮中没有成为簇首的节点集合。

考虑式(6)对网络平均能量的估计,为了在首个节点死亡后整个网络能保持均衡的消耗网络能量,而簇首消耗的能量又比一般节点要大的多,因此本算法考虑传感器节点只有在其剩余能量大于网络的平均能量时才能成为簇首,图1为本协议中簇首建立算法流程图。

3.2 簇内节点动态休眠调度策略设计

LEACH 分簇算法的工作过程主要包括成簇和数据传输阶段,在数据传输阶段 LEACH 采用的是固定的休眠方式,文中采用动态休眠的方式尽可能地延长网络的生命周期,即当传感器网络的部署区域内感知到目标时,为保证能有很好的探测效果,应该有尽量多的感知到目标的传感器处在工作状态,而不必要唤醒的节点尽量保持休眠状态以节省网络能量,达到延长网络生命周期的目的。

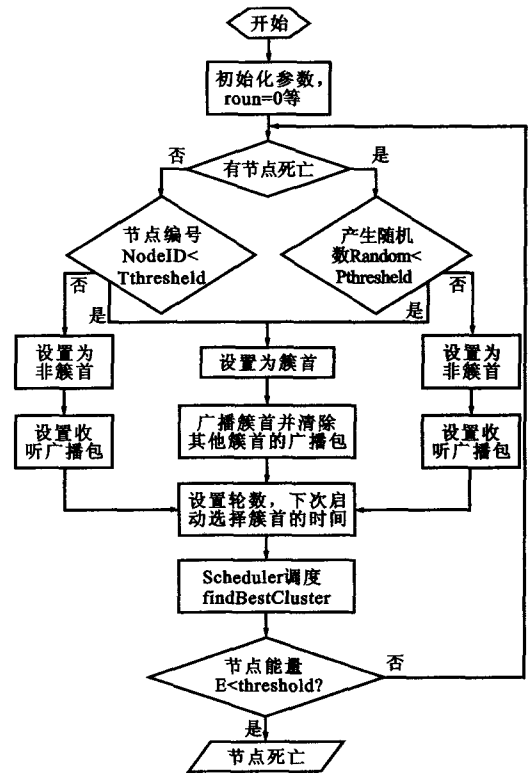


图1 簇首建立的算法流程图

假设在 t 时刻,节点 S_i 的信息素 $I_i(t)$ 也在不断的挥发,定义一个周期内的分解率为 $\eta \in [0, 1]$,则每个周期将有 $\eta I_i(t)$ 挥发到环境中,即在 $t+1$ 时刻将只有 $(1-\eta)I_i(t)$ 信息素剩余,而 $\text{neighbor}(i)$ 内所有节点同时也接收来自其他邻居节点挥发的信息素进行累积,定义一个传感器节点 S_i 在发现目标 M 后向环境中分泌的信息素为:

$$\epsilon_i(t) = \begin{cases} 1, & i \in \text{Sensor}(m) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

其中 $i = 1, \dots, n$ 。

同时分泌的信息素可被 S_i 的所有邻居节点 $\text{neighbor}(i)$ 所吸收以进行信息素的累积,定义 $t+1$ 时刻的节点 S_i 信息素的累计量为 $\Delta I_i(t+1)$,由下式计算:

$$\Delta I_i(t+1) = \sum_{k \in \text{neighbor}(i)} \epsilon_k(t) \quad (10)$$

信息素分解率 η 是表示蚂蚁节点 t 时刻的信息素对于 $t+1$ 时刻的影响程度,这与被监测目标运动或者变化的速度有关,信息挥发的越快,分解率 η 就越大,前一时对后一时信息素的累加也就越小,因此 $t+1$ 时刻的信息素由 t 时刻的信息素挥发后的量 $(1-\eta)I_i(t)$ 和在环境中吸收的信息 $\Delta I_i(t+1)$ 素两部分组成。

为了确保能更加均衡的消耗网络能量,本算法

考虑在蚂蚁节点进行信息素更新前先比较自身能量和网络平均能量之间的关系,如果自身能量不足,则不进行信息素更新,因为信息素更新后会直接影响到节点的唤醒概率,即蚂蚁节点 S_i 在 t 时刻的信息素更新公式可以如下形式表示:

$$I_i(t) = \begin{cases} \max(I_{\min}, (1 - \eta)I_i(t - 1)) & E_i(t) \leq E_{ave} \\ \min(I_{\max}, \max(I_{\min}, (1 - \eta)I_i(t - 1) + \Delta I_i(t))) & E_i(t) > E_{ave} \end{cases} \quad (11)$$

由前所述,蚂蚁节点的唤醒与否与其当前的能量和自身对环境的信息素大小有关,而节点当前的能量作为阈值拥有决定传感器唤醒/休眠的一票否决权,而信息素的大小也应作为一个参数决定蚂蚁节点唤醒与否的概率,综合文献[5]给出的最大信息素,从而得出蚂蚁节点的唤醒概率如下:

$$W_i(t) = \begin{cases} 0 & E_i(t) \leq E_{ave} \\ I_i(t)/I_{\max} & E_i(t) > E_{ave} \end{cases} \quad (12)$$

下面给出休眠调度算法的流程图,如图 2 所示.

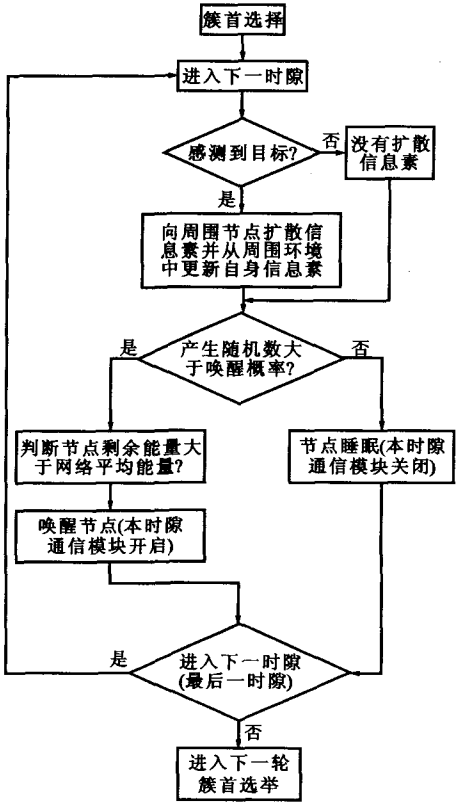


图 2 休眠调度算法流程图

4 仿真和分析

为了充分说明本协议的有效性,文中在 $100 \times$

100 的区域中部署 100 个节点,采用以下四中算法进行对比实验:算法 A 是采用 LEACH 固定的唤醒概率 $P_{Wake} = 0.1$ 进行实验;算法 B 为 LEACH 的一个改进算法 SEP 进行实验;算法 C 采用 LEACH 原协议中的簇首选举方式,并采用文中的动态唤醒概率唤醒簇内节点;算法 D 是文中所提出的完整算法,即采用改进 LEACH 簇首选举方式,网络中节点处于唤醒状态的节点必须是节点能量大于计算得出的网络平均能量,然后再根据节点对目标的信息素更新作出是否唤醒的决定.为了让结果显示得更加直观,将四种算法列入表 1 进行对比.

表 1 四种算法的死亡节点所占比率数据对比

死亡节点所占比例(%)	0	20	40	95
算法 A(轮)	255	282	291	351
算法 B(轮)	420	430	440	500
算法 C(轮)	582	685	742	1337
算法 D(轮)	622	717	800	1493

由表 1 可以看到在算法 A 中在 255 轮时首先出现死亡节点,并且可以发现在接下来的 100 轮中几乎 95% 的节点因能量消耗殆尽而失效,如果以网络节点数 95% 作为评价网络失效的临界点的话,节点在首次出现死亡节点后其邻居节点也快速能量耗尽,从而整个网络失效.

算法 C 采用信息素更新的方式动态调整节点的唤醒概率,首个死亡节点在第 582 轮是才出现,并且从第一个节点进入死亡状态到网络失效经历的时间相比算法 1 要长的多.

算法 D 是经过节点计算得出的平均能量作为约束自身唤醒概率,首个死亡节点在第 622 轮才出现,在死亡节点数已达到节点总数的 80% 时算法 D 仍然较算法 C 有较长的生命周期.从几次实验的结果看,剩余节点的分布还是分散在部署区域中的,因此算法 D 对于延长网络生命周期是有效果的.

5 结束语

为了延长网络的寿命,文中提出一种基于休眠控制的无线传感器网络分簇协议,本协议首先针对 LEACH 分簇算法中簇首选举过程,主要考虑网络平均能量和簇首个数的均衡,在数据传输阶段利用蚂蚁群体间交换信息素的构成信息“正反馈”的思想,设计了簇内节点动态睡眠的机制,实验仿真结果表明算法是合理并有效的.

意一个资源子集 R_1 , 给出一个判定存在以 R_1 为资源集的资源变迁回路的充分必要条件. 最后, 若资源变迁回路 $\theta = \langle R_1, (\cdot R_1 \cap R_1') \rangle$ 满足完美条件, 则 θ 即为 N 的以 R_1 为资源集的完美极大资源变迁回路.

参考文献:

- [1] 王安荣, 李志武. 基本信标计算的一种快速算法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2008, 35(4): 632 - 638.
- [2] Li Z W, Zhou M C, Wu N Q. A survey and comparison of petri net - based deadlock prevention policies for flexible manufacturing systems[J]. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C. Applications and Reviews, 2008, 38(2): 173 - 188.
- [3] Ezpeleta J, Colom J M, Martinez J. A petri net based deadlock prevention policy for flexible manufacturing systems[J]. IEEE Trans. Robot. Automat., 1995(11): 173 - 184.
- [4] Li Z W, Zhou M C. Elementary siphons of petri nets and their application to deadlock prevention in flexible manufacturing systems[J]. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. A. Syst., Humans, 2004, 34(1): 38 - 51.
- [5] 刑科义, 许宏斌, 胡保生. 多资源服务处理系统的活性控制策略[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(12): 2096 - 2102.
- [6] Park J, Reveliotis S A. Deadlock avoidance in sequential resource allocation systems with multiple resource acquisitions and flexible routings[J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 2001(46): 1572 - 1583.
- [7] Xing K Y, Tian F, Yang X J. Optimal deadlock avoidance Petri net supervisors for automated manufacturing systems[J]. Journal of Control Theory and Applications, 2007, 5(2): 152 - 158.
- [8] Xing K, Zhou M, Shi K, et al. Enumeration algorithms for maximal perfect - resource - transition circuits and strict minimal siphons in S3PR[C]// Proc. 17th IFAC World Congr. Seoul, Korea, 2008: 14490 - 14495.
- [9] Keyi Xing, Meng Chu Zhou, Huixia Liu, et al. Optimal petri - net - based polynomial - complexity deadlock - avoidance policies for automated manufacturing systems[J]. Systems, Man and Cybernetics, Part A, IEEE Transactions on, 2009, 39(1): 188 - 199.
- [10] Murata T. Petri nets: properties, analysis and application[J]. IEEE, 1989, 77(4): 541 - 579.
- [11] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [12] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

作者简介:

岳 昊 男, (1980 -), 博士, 讲师. 研究方向为制造系统控制与优化调度 Petri 网理论及应用.

(上接第 229 页)

参考文献:

- [1] Heinzelman W B. An application - specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on wireless communications, 2002(1): 660 - 670.
- [2] Georgios Smaragdakis, Ibrahim Matta, Azer Bestavros. SEP: a stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks[C]// Second International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications. Sanpa, 2004.
- [3] Yao Lan, Cui Xiuli, Wang Meng. An energy - balanced clustering routing algorithm for wireless sensor networks[C]// World Congress on Computer Science and Information Engineering. Washington, DC, 2009: 316 - 320.
- [4] Rui Hou, Weizheng Ren, Yaodong Zhang. A wireless sensor network clustering algorithm based on energy and distance[C]// 2009 Second International Workshop on Computer Science and Engineering. IWCSE, 2009(1): 439 - 442.
- [5] Wu Y, Fahmy S. Optimal sleep/wake scheduling for time - synchronized sensor networks with qos guarantees[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 17(5): 1508 - 1521.

作者简介:

王慧斌 男, (1967 -), 博士, 副教授. 研究方向为信号与信息处理技术、图像信息获取与多媒体通信、信息系统分析与集成.