

文章编号: 1001-0920(2006)04-0400-05

传感器网络中能量最优化的聚类轮换算法

王永才, 赵千川, 郑大钟
(清华大学自动化系, 北京 100084)

摘要: 针对无线传感器网络节点能量难以补充, 如何延长网络使用寿命的问题, 将网络工作过程描述为不定阶段动态规划问题, 结合总能量守恒关系推导出网络寿命上下界, 提出能量优先的聚类轮换策略并证明了其最优性。在此基础上, 设计了实用性好的最小切换聚类轮换算法 (SSL), 利用 PowerTOSSM 仿真实验验证了 SSL 取得接近最优的网络寿命。

关键词: 能量最优化; 聚类轮换; 动态规划; 传感器网络
中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

Energy Optimized Cluster Rotation Algorithm in Wireless Sensor Networks

WANG Yong-cai, ZHAO Qian-chuan, ZHENG Da-zhong

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China. Correspondent: WANG Yong-cai, E-mail: wangyongcai@mails.tsinghua.edu.cn)

Abstract: Wireless sensor networks (WSN) are promising in many military and civil applications. Due to the difficulty of energy recharging, prolonging the lifetime of WSN systems is one of the key challenges. The working process of WSN is formulated as a variable-stage dynamic programming problem. The upper bound and lower bound of system lifetime are derived based on the energy conservation law. An energy-first cluster rotation strategy is proposed and proved to be the optimal, based on which, a practical smallest switching longest lifetime cluster rotation algorithm (SSL) is proposed. Simulation results with PowerTOSSM verify that the SSL algorithm achieves almost optimal system lifetime.

Key words: Energy optimized; Cluster rotation; Dynamic programming; Wireless sensor networks

1 引言

集成无线通信、数据处理、多类型传感功能的微型传感器通过无线通信组成传感器网络, 它是一种新型分布式数据采集系统, 在军事入侵检测、环境信息采集、交通流量监控等领域具有广阔的应用前景^[1,2]。但这种微型传感器的使用寿命受电池能量的限制, 因此能量优化^[3~7]是传感器网络研究中最重要的问题之一。

为延长网络寿命, 设计和调度节点“休眠态”是主要解决手段。随机 On/Off, 周期 On/Off^[4]等简单协议不能保证可靠的网络性能。GAF^[5]设置等价

地理网格, 需要预先知道节点位置信息, 且不能进行复杂数据处理。聚类思想取得突破性进展: 网络中节点自组织形成多个聚类, 每个聚类由一个头节点进行数据处理并代表本聚类同其他聚类通信。为避免头节点能量过度消耗, 头节点需要进行轮换。LEACH^[6]和 EDAC^[7]分别采用随机轮换和能量驱动轮换策略取得了很好的节能效果。但这两种方法都是启发式的算法, 缺乏最优性保证。对聚类内能量消耗过程缺少理论分析, 使得寿命上下界和理论最优寿命仍然未知, 最优的轮换策略也有待研究。

本文将基于聚类的传感器网络工作过程描述成

收稿日期: 2005-03-28; 修回日期: 2005-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60274011, 60574067); 教育部新世纪优秀人才计划项目 (NCET-04-0094)。

作者简介: 王永才 (1978—), 男, 吉林舒兰人, 博士生, 从事传感器网络的研究; 赵千川 (1969—), 男, 河北唐县人, 教授, 博士生导师, 从事离散事件动态系统的研究。

不定阶段的动态规划问题, 利用能量守恒关系建立了网络寿命与剩余能量的等价关系, 推导出网络寿命上下界的闭式表达 提出并证明了能量优先的轮换策略是头节点轮换的最优策略 在此基础上, 结合应用中对额外能耗最小化的要求, 提出了实用性较好的最小切换次数聚类轮换算法 (SSLL). 仿真实验表明, 所提的 SSLL 算法比 LEACH 和 EDAC 更有效延长网络寿命, 取得接近最优的效果

2 聚类轮换运行模式

传感器网络布置在指定区域持续采集数据, 它自组织地形成 N 个分布式的聚类, 每个聚类由选出的头节点做数据处理并与其他聚类通信 头节点需要轮换以避免能量快速耗尽 在数据采集过程中, 成员节点采用较小的通讯半径向头节点汇报数据, 由头节点经过数据处理后采用较大半径发送到其他聚类头节点或基站 图 1 展示了传感器网络聚类工作模式

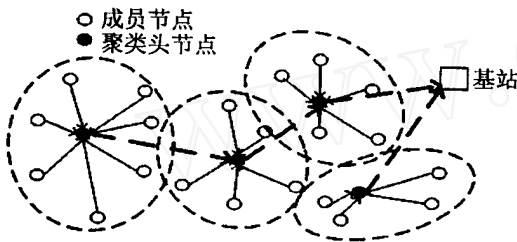


图 1 传感器网络基于聚类的数据采集方式

如果把每个采样周期头节点是否轮换描述为一个决策问题, 那么本周期的决策将影响后续周期的节点剩余寿命 由于优化的目标是网络运行的周期数, 所以聚类轮换问题可描述为一个不定阶段的动态规划问题 为清楚描述问题, 定义传感器网络的寿命 T 为网络中第一个节点能量耗尽时的网络运行时间^[4] 这种定义方法考虑网络整体运行时间, 假设节点都是由于能量耗尽而“死亡”, 不考虑节点意外故障的情况, 在某些节点“死亡”之后认为网络性能将难以保障

3 聚类轮换动态规划描述

按照 LEACH^[6] 和 EDAC^[7] 中的能耗模型, E_s , E_F , E_{R_x} , E_{T_x} 分别表示每个周期内节点数据采集、数据压缩、数据接收和发送时的能量消耗 设每个聚类中包含 n 个持续工作成员节点和一个头节点, 成员节点以通讯半径 c 向头节点汇报数据, 头节点以通讯半径 C 发送数据处理的结果, 则一个周期中聚类头节点的能量消耗可以描述为

$$E_{CH} = E_s + n(E_{R_x} + E_F) + E_{T_x}(C), \quad (1)$$

每个成员节点的能量消耗可以描述为

$$E_{mem} = E_s + E_{T_x}(c). \quad (2)$$

其中: $n(E_{R_x} + E_F)$ 是头节点接收和压缩 n 个数据包的能耗; E_{T_x} 是通讯能耗, 与通讯半径的 2~4 次方成正比 $E_{T_x}(c) \propto c^{2-4}$.

对比动态规划模型, 第 t 个周期网络状态可以用节点剩余能量描述: $E(t) = [E_1(t), \dots, E_{n+1}(t)]^T$. 第 t 个周期的决策可用 $A(t) = [0 \dots 1 \dots 0]^T$ 向量描述, 其中 1 代表该节点是头节点, 0 代表成员节点 t 时刻网络剩余寿命表示为 $T_i(t)$, 其动态变化过程可用如下动态规划描述:

1) 阶段变量: 周期计数 t .

2) 状态变量: 节点剩余能量 $E_i(t)$, $i = \{1, 2, \dots, n+1\}$.

3) 决策变量: 头节点的决策 $A(t)$.

4) 状态转移方程

$$E_i(t+1) = E_i(t) - A_i(t)E_{CH} - (1 - A_i(t))E_{mem}, \quad i = \{1, 2, \dots, n+1\}. \quad (3)$$

5) 阶段指标: t 阶段网络寿命

$$v(E_i, A_i) = t + T_i(t). \quad (4)$$

基本方程可以描述为

$$\begin{cases} T_i(t) = \max\{1 + T_i(t+1)\}, \\ E_i(t+1) = 0, i = 1, 2, \dots, n+1. \end{cases} \quad (5)$$

由于基本方程是 $T_i(t)$ 的函数关系, 所以式 (5) 是不定阶段的动态规划问题

4 聚类轮换问题的最优解

分析问题 (5), 若用 T 表示网络寿命截至时的阶段数, 则头节点决策序列 $\{A(1), A(2), \dots, A(T)\}$ 组成一个完整策略, 策略空间大小为 $(n+1)^T$, 随 n 和 T 增加呈指数爆炸, 需要结合问题特点寻找最优解

4.1 网络寿命上界

设网络寿命最优解表示为 T^* , 上界表示为 \bar{T} , 下界表示为 T . 网络能量消耗必须满足能量守恒关系 头节点一个周期的能量消耗为 E_{CH} , 成员节点为 E_{mem} , 则问题 (5) 的网络寿命受以下两种限制:

1) 网络寿命受能量最少的节点限制 网络寿命不会大于能量最少节点一直做成员节点时的网络寿命, 即

$$T \leq \frac{\min\{E_1(0), E_2(0), \dots, E_{n+1}(0)\}}{E_{mem}}. \quad (6)$$

2) 网络寿命受总能量限制, 网络消耗能量小于等于所有节点的初始能量之和, 即

$$T(E_{CH} + nE_{mem}) \leq \sum_{i=1}^{n+1} E_i(0). \quad (7)$$

所以网络寿命的上界为

$$\bar{T} = \min_{n+1} \left\{ \frac{\min\{E_1(0), E_2(0), \dots, E_{n+1}(0)\}}{E_{\text{mem}}}, \frac{E_i(0)}{E_{\text{CH}} + nE_{\text{mem}}} \right\} \quad (8)$$

4.2 网络寿命的下界和能量守恒关系

最差决策情况是指每个周期都选择能量最少的节点做聚类头节点, 网络寿命不小于能量最少的节点总是做头节点时网络运行周期数, 即

$$T \left\lfloor \frac{\min\{E_1(0), \dots, E_{n+1}(0)\}}{E_{\text{CH}}} \right\rfloor = T \quad (9)$$

其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整

根据网络寿命的定义, 网络寿命耗尽可归结为两种情况: 1) 网络中至少有一个节点剩余能量低于 E_{mem} ; 2) 网络中所有节点的剩余能量都低于 E_{CH} ; 这两种情况都会因为式(5)中约束条件不能满足而终止. 若剩余能量 $E(T)$ 满足上述条件之一, 则剩余能量为浪费能量, 表示为 $\epsilon(T)$. 网络运行过程的能量守恒关系可以表示为

$$T(E_{\text{CH}} + nE_{\text{mem}}) = \sum_{i=1}^{n+1} E_i(0) - \sum_{i=1}^{n+1} \epsilon(T) \quad (10)$$

4.3 网络寿命最优化策略

聚类初始能量为 $E(0) = \{E_i(0), i = 1, 2, \dots, n+1\}$, 网络剩余寿命是网络剩余能量的函数为 $T = F(E(T))$. 在第一个阶段若选择节点 j 为头节点, 第一个阶段后网络剩余能量为 $E(1) = [(E_1(0) - E_{\text{mem}}), \dots, (E_j(0) - E_{\text{CH}}), \dots, (E_{n+1}(0) - E_{\text{mem}})]^T$, 则网络最优寿命不小于1加上以当前剩余能量求得网络的最优寿命, 即

$$T^* \geq 1 + F(E(1)) \quad (11)$$

以此方式递推, 当经过 t 个阶段后, 若网络剩余能量不满足约束条件, 剩余能量为 $\epsilon(t)$, 则

$$T^* \geq t + F(\epsilon(t)) \quad (12)$$

根据式(10)和(12), 求解 T^* 的过程等价于寻找递推算法使得 $\sum_{i=1}^{n+1} \epsilon_i(t)$ 之和最小. 基于这一认识, 提出能量优先的头节点选择策略并证明其最优性.

能量优先策略为在每个阶段总是优先选择剩余能量最多的节点做聚类头节点, 当满足条件节点多于1个时, 从中随机选取1个.

引理1 对任意两个节点 a 和 b , 若在网络寿命 T 结束时, 两个节点担任头节点次数相等, 则节点消耗能量相等: $E_a(0) - \epsilon_a(T) = E_b(0) - \epsilon_b(T)$.

引理2 对于任意两个节点 a 和 b , 若在第 t 个阶段 $E_a(t) > E_b(t)$, 为使得运行结束时网络剩余能量最少, 在后续 $T^* - t$ 个阶段中, a 做头节点的次数

必然大于等于 b 做头节点的次数

证明 反证法, 设 b 在后续 $T^* - t$ 个阶段中做头节点的次数 T_b 大于 a 做头节点的次数 T_a , 则网络寿命终止时 a, b 两个节点剩余寿命之差为

$$\begin{aligned} \epsilon_a(T) - \epsilon_b(T) &= \\ E_a(0) - E_b(0) + (T_b - T_a) \cdot \\ (E_{\text{CH}} - E_{\text{mem}}) &> (E_{\text{CH}} - E_{\text{mem}}). \end{aligned}$$

若 T_a 增加一次, T_b 减少一次, 可得

$$\begin{aligned} E_a(T) &= E_a(0) - E_{\text{CH}} + E_{\text{mem}} > 0, \\ E_b(T) &= E_b(0) + E_{\text{CH}} - E_{\text{mem}} > 0 \end{aligned}$$

网络剩余能量

$$E_a(T) + E_b(T) < \epsilon_a(T) + \epsilon_b(T).$$

若初始能量 $E_a(0) - E_b(0) > 2E_{\text{CH}} - E_{\text{mem}}$, 则由于 $E_a(T) > E_{\text{CH}}, E_b(T) > E_{\text{mem}}$, 选择 a 做头节点可使网络寿命再延长一个周期, 有

$$E_a(T+1) + E_b(T+1) < \epsilon_a(T) + \epsilon_b(T).$$

所以若要节点剩余能量最少, 必有 $T_a \geq T_b$.

定理1 能量优先策略能获得最优的网络寿命

证明 在第 t 个阶段, 若各节点剩余寿命为 $E_i(t), i = 1, 2, \dots, n+1$, 其中剩余能量最多的为 $E_j(t)$. 则根据引理2, 为使运行结束时节点剩余能量之和最小, j 在后续 $T^* - t$ 个阶段中担任聚类头节点的次数要高于其他任何一个节点. 所以在第 t 个阶段应该选取 j 作为头节点以使网络剩余能量最小. 能量优先策略从 $t = 0$ 开始, 每个阶段的决策都保证最优性, 所以到递推结束时网络剩余能量 $\epsilon(T)$ 是最小的.

根据能量守恒关系(10), 网络运行阶段得以消耗最多的可用能量, 所以网络寿命最优.

4.4 最优策略的不唯一性

设在最优策略 S 中第 t_i 个阶段的头节点为 i , 第 t_j 个阶段头节点为 j , 如果更改策略为 S' , 在 t_i 个阶段选择 j 为头节点, 第 t_j 个阶段选择 i 为头节点, 在这两个阶段中其他节点能量消耗都还是 $2E_{\text{mem}}$, 所有节点的剩余能量相比策略 S 时都不发生变化, 所以策略 S' 仍然是最优策略.

5 最小切换最优寿命轮换策略和实用算法

在实际应用中, 聚类的轮换过程需要由前任头节点发广播消息“退任”, 并由新任头节点广播消息“继任”, 这些能量消耗称为额外能耗^[7]. 为实现能量最优的聚类轮换, 实际应用要求减少轮换次数以降低额外能耗.

5.1 最小切换最优寿命轮换策略

根据最优策略的不唯一性, 若在最优化策略中节

点 i 共在 T_i 个阶段中担任过头节点, 则让节点 i 连续担任 T_i 个阶段头节点, 网络寿命仍然是最优的 而在这连续 T_i 个阶段中, 聚类头节点不需要轮换, 所以若能够预先知道每个节点在最优策略中担任头节点次数, 并在实际应用中使节点连续担任指定阶段数的头节点, 即可实现最优的头节点轮换, 而且只需最少的轮换次数, 称为最小切换最优寿命轮换策略

5.2 对最优策略的放松

实现最小切换最优轮换策略, 需要预先知道网络最优寿命, 图 2 中比较了网络寿命上界、下界、最优寿命和随机轮换时的网络寿命 从比较中可见网络寿命上界非常接近最优寿命, 这是由于能量守恒关系对剩余能量的限制

实际应用中并不要求精确的最优策略, 可以利用上界公式(8)快速估算网络最优寿命, 并根据最小切换最优轮换策略, 计算并指定每个节点担任头节点的周期数和优先级

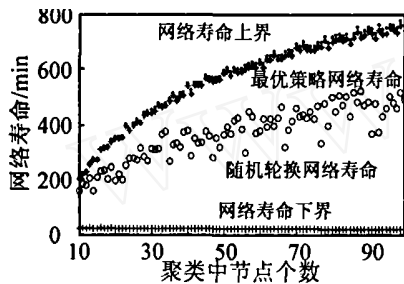


图 2 网络寿命分析和比较

5.3 实用聚类轮换算法

Step 1: 初始化时聚类头节点随机产生, 收集聚类中节点初始能量信息 $E(0) = \{E_i(0), i = 1, \dots, n + 1\}$.

Step 2: 头节点利用式(8)计算网络寿命上界 \bar{T} .

Step 3: 头节点对节点剩余能量排序, 设定优先级 P_j , 并利用能量优先原则计算各节点担任头节点周期数 T_j , 使

$$\min \{E_i(0) - [T_i E_{CH} + (\bar{T} - T_i) E_{mem}]\}$$

最小, 并将计算结果 T_j 和优先级 P_j 通知给 j 节点

Step 4: 优先级为 P_j 的节点连续担任头节点 T_j 个阶段, 然后由下一优先级的节点继续担任头节点指定阶段数, 并依此进行, 直至网络寿命结束

5.4 算法分析

分析算法复杂度 第一阶段头节点随机选取, 复杂度为 $O(n)$, 排序算法复杂度为 $O(n \log(n))$, 求解 n 个线性不等式复杂度为 $O(n)$, 总的计算复杂度仍为 $O(n \log(n))$. SLL 是放松的最优策略, 用网络寿命上界代替最优寿命, 避免了复杂的寻优过程 头节点只需要将计算结果发送给成员节点, 即可实现以

较小的计算和通讯代价, 实现接近最优的聚类轮换, 具有较好的实用价值

6 实验分析

6.1 实验平台

实验采用了 Mica2 系统的能量仿真平台 PowerTOSSM^[8]. 它是 TinyOS 环境下传感器网络硬件级别仿真工具, 能准确描述节点在每个时钟周期的各硬件模块能量消耗过程 PowerTOSSM 的仿真程序同写入 Mica2 节点的程序完全一致, 通过其仿真程序可以直接在 Mica2 节点上运行, 具有评价准确、实用性好的特点

6.2 实验设置

实验设置聚类节点数 $N = 10, 20, \dots, 100$ 根据 AVORA^[9] 实验 AA 电池在 Mica2 节点上电压从 3.3V 衰减到 2.1V 过程中使用寿命的能量测试, 节点初始能量设置为均匀分布在 $[15\ 000, 30\ 000]$ (J) 之间的随机变量 实验中决策周期时间长度为 60 s, 在每个决策周期中, 聚类成员节点以 25 ms 的采样周期采集光强, 并将检测结果以最小发射功率 SetRFPower(0x01) 发送给聚类头节点, 数据包大小为 10 bytes 头节点接收成员节点的数据, 将成员节点的数据求平均值, 并将均值结果以最大发射功率 SetRFPower(0xFF) 发送给基站 其中 SetRFPower() 是 CC1000 的功率控制模块, 可调参数范围为 0x01 ~ 0xFF, 对应可调通讯半径约为 4.5 ~ 90 m.

6.3 能耗分析

PowerTOSSM 可以描述节点每个模块每个周期各个功能模块的能耗 表 1 是成员节点在 100 次仿真后每个决策周期平均能耗 表 2 是在聚类中有 20 个成员节点时, 聚类头节点在一个决策周期内的平均能耗情况 比较表 1 和表 2 可见成员节点与聚类头节点的主要能耗差别在于通讯部分, 头节点一个周期的能耗约为成员节点的 12 倍

表 1 成员节点在 60 s 内平均能耗 (mJ)

能耗种类划分	消耗能量
CPU total	724.235 8
Radio total	857.287 4
ADC total	0
Leds total	361.919 1
Sensor total	120.998 2
Eeprom total	0
CPU . circle total	0
Total energy	2 064.441

表2 聚类头节点在60 s内平均能量消耗 (mJ)

能耗种类划分	消耗能量
CPU total	831.584 3
Radio total	22 746 455 1
ADC total	0
Leds total	891.428 1
Sensor total	122.766 1
Eeprom total	0
CPU-circle total	0
Total energy	245 92 233 6

6.4 轮换策略比较

实验比较了SSLL, LEACH^[6]和EDAC^[7]3种算法取得的网络寿命,并同头节点从不轮换和理论最优寿命 T^* 做了比较,图3总结了当聚类节点数 N 从10变化到100时的比较结果

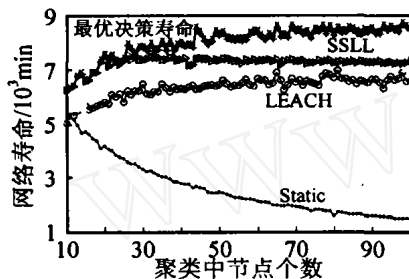


图3 不同轮换策略下网络寿命比较

实验结果表明3种轮换算法都比静态聚类显著延长网络寿命,SSLL比LEACH^[6]和EDAC^[7]等使网络寿命明显延长,在理论分析的指导下取得了接近理论最优寿命 T^* 的网络寿命.表3比较了当聚类中节点个数 $N=100$ 时,3种轮换算法下的头节点轮换次数,SSLL取得了最少的轮换次数.由于在每次头节点轮换时,命令发布要消耗一些额外能量,SSLL最有效地减少了额外能量损失

表3 $N=100$ 时聚类头节点轮换次数

轮换策略	头节点轮换次数
SSLL	32
EDAC	70
LEACH	6 705

7 结 论

本文研究了能量最优的传感器网络聚类头节点轮换策略.将聚类轮换问题描述为不定阶段动态规划问题,给出网络寿命的上下界,提出能量优先的最优头节点轮换策略,并证明其最优性.根据最优策略的不唯一性设计了实用性好的最少切换次数聚类

轮换算法(SSLL).其算法复杂度仅为 $O(n \log(n))$ 且分布式实现简单易行.利用硬件级别仿真环境PowerTOSSM验证了理论分析结果和SSLL算法. SSLL比LEACH^[6],EDAC^[7]都能显著延长网络寿命,仅用最小的切换次数,却取得接近最优的网络寿命

参考文献(References)

- [1] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless Sensor Networks: A Survey [J]. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 393-422
- [2] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. *软件学报*, 2003, 14(7): 1282-1291.
(Ren F Y, Huang H N, Lin C. Wireless Sensor Networks [J]. *J of Software*, 2003, 14(7): 1282-1291.)
- [3] 叶弛, 孙利民, 廖勇. 传感器网络的能量管理[J]. *计算机工程与应用*, 2004, 8: 196-199.
(Ye C, Sun L M, Liao Y. Energy Management in Wireless Sensor Networks [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2004, 8: 196-199.)
- [4] Patten S, Poduri S, Krishnamachari B. Energy-quality Tradeoffs for Target Tracking in Wireless Sensor Networks [A]. *Lecture Notes in Computer Science* 2634 [C]. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 32-46
- [5] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing [A]. *Proc 7th Ann Int Conf on Mobile Computing and Networking* [C]. 2001: 70-84
- [6] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks [A]. *Proc Hawaii Int Conf on System Sciences* [C]. Hawaii, 2000: 3005-3014
- [7] Yongcai Wang, Zhao Q, Zheng D. Energy-driven Adaptive Clustering Data Collection Protocol in Wireless Sensor Networks [A]. *Proc Int Conf on Information Electronics and Automation* [C]. Chengdu, 2004: 599-604
- [8] Shnayder V, Hempstead M, Chen B. Simulating the Power Consumption of Large-scale Sensor Network Applications [A]. *Proc of SENSYS'04* [C]. Baltimore, 2004: 188-200
- [9] Titzer B L, Lee D K, Palsberg J. Avra: Scalable Sensor Network Simulation with Precise Timing [A]. *Proc 4th Int Symposium on Information Processing in Sensor Networks* [C]. California: UCLA Los Angeles, 2005: 477-482