

能量有效的无线传感网络节点调度算法研究

徐 萍, 曾兴斌*, 何加铭

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 在无线传感网路中, 在某些情况下引入以节点地理位置为分簇依据的 GAF 算法虽能有效节省节点能量, 但由于其随机选择簇头, 没有考虑簇头最佳位置分布, 因此并不能对节点能量进行充分利用. 针对此问题, 提出一种新的改进算法 L-GAF 算法, 其主要思想是寻找最佳位置簇头节点, 通过定期动态转换虚拟单元格, 改变节点与中心点的距离, 利用节点度策略和节点剩余能量优化簇头选举机制, 均衡能量分布. 实验证明: 与 GAF 算法相比, 此算法延长了网络的生命周期, 提高网络的负载能力.

关键词: 无线传感器网络; GAF 算法; 虚拟单元格; 节点度

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2013) 01-0028-05

随着通信技术、嵌入式计算技术和传感器技术的飞速发展和日益成熟, 具有感知能力、计算能力和通信能力的微型传感器开始在世界范围内陆续出现^[1]. 针对传感器网络规模超大、节点自身资源受限的特点, 尽量减少节点耗能、延长网络生存时间成为研究的主要目标. GAF (Geographic Adaptive Fidelity) 算法是一种以节点地理位置为依据的层次拓扑控制算法^[2], 该算法将监测区域划分为互不重叠的虚拟单元格, 并让节点尽量处于关机状态; 每个单元格只有簇头节点保持工作状态, 其余节点进入睡眠状态. 但是 GAF 算法随机选择簇头节点, 未考虑节点的剩余能量, 致使某些簇头节点承担过多的任务, 这就不可避免地导致“热区”问题^[3], 即邻近簇头节点的传感器由于转发大量数据, 使其能量消耗过快, 造成网络分割, 缩短了整个网络的生命周期.

针对 GAF 算法簇头随机选择、能耗不均衡、“热区”等问题, 笔者提出一种最佳位置簇头选举算法 Best Location-GAF(L-GAF). 算法采用窝蜂结构区域划分模式, 定期动态划分虚拟网格^[4], 按照最大剩余能量原则寻找最佳适宜的簇头. 一旦

簇头选取, 距离簇头一跳的节点将会担任大量信息转发工作和一定的数据融合工作, 但仅仅依靠拥塞控制、分簇式网络设计等并不能彻底改善簇头附近节点的瓶颈问题^[5]. 因此改进算法, 加入节点度策略, 优化簇头选举机制, 解决“热区”问题, 使其具有更好的网络负载均衡性^[6].

1 蜂窝栅格划分和 GAF 原理

1.1 栅格划分

Xu 等^[7]等提出一种基于位置的节点睡眠调度算法 GAF. 它将网络区域分成格的形状, 每个网格内只有 1 个活跃节点进行工作. 为更加精确覆盖监测区域, 结合蜂窝网的提示, 采用正六边形的蜂窝结构区域划分. 以感知半径 r 为单位划分监测区域, 图 1 即为给出的虚拟网格划分. 为保持网络的连通性, 假设节点传输半径 R , 满足虚格划分条件, 则

$$R \geq \sqrt{13}r. \quad (1)$$

从图 1 分析可知, $m = (\quad)r$, $h = (\sqrt{3}/2)r$, 根据 x, y 坐标轴建立仿真区域; 节点记录自身的 ID 以及所属区域的 GroupID, 并按照位置信息划入相应的单元格.

收稿日期: 2012-07-03.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://nbdxlg.paperopen.com/>

基金项目: 国家科技重大专项 (2011ZX03002-004-02); 浙江省移动网络应用技术联合重点实验室项目 (2010E10005);

浙江省重大科技专项 (2011C11042).

第一作者: 徐 萍 (1987—), 女, 浙江富阳人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 无线传感器网络. E-mail: 498371057@qq.com

*通信作者: 曾兴斌 (1968—), 男, 江西赣州人, 副教授, 主要研究方向: 无线通信. E-mail: zengxingbin@nbu.edu.cn

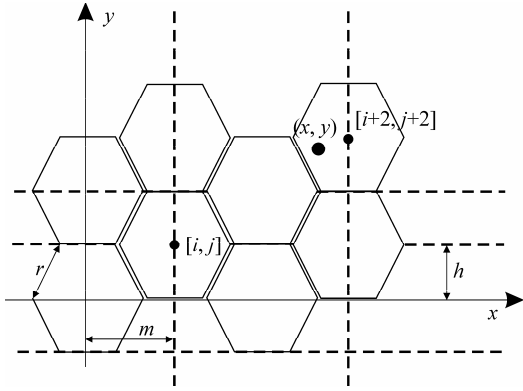


图1 虚拟单元格划分

1.2 GAF 算法原理

在 GAF 算法中, 节点有 3 个状态: 睡眠状态(sleeping)、活跃状态(active)和发现状态(discovery), 其状态转移过程如图 2 所示. 初始化时, 所有节点都处于发现状态并交换信息, 信息包括节点(ID)、节点所在网格(GroupID)、节点状态(State)、节点剩余能量($E_{\text{剩}}$). 经过此阶段, 节点知道相同格内的以上信息. 进入发现状态, 节点设定 1 个定时器 T_d , 超时后, 进入活跃状态. 如果在 T_d 内收到同一单元格内其他节点成为簇头的声明, 说明簇头竞争失败, 即进入睡眠状态. 成为簇头的节点设置定时器为 T_a (活跃状态时间), 在 T_a 超时之前, 簇头节点定期发送广播包声明自己处于活跃状态. 处于睡眠状态的节点设置定时器为 T_s , 并在 T_s 超时后, 重新回到发现状态.

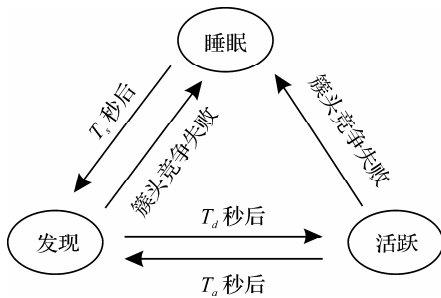


图2 节点状态转移

2 动态簇转换机制

2.1 簇头位置分析

设每个虚拟网格分布采用正六边形, 边长为 r , 节点根据分布概率 p_i 均匀随机分布;

设每个传感器节点接收、发送数据包消耗的能量相同, 基于文献[8]给出的能量消耗模型, 节点

发射 k bit 数据到距离 d 位置的能量为:

$$E_{TX}(k, d) = kE_{\text{elec}} + k\epsilon_{fs}d^2. \quad (2)$$

采用自由传感模型, 其中 E_{elec} 表示传感器发射每比特数据的能耗; $\epsilon_{fs}d^2$ 为发射功放依据自由空间传播模型的能耗. 节点接收 k bit 数据消耗能量为:

$$E_{RX}(k) = kE_{\text{elec}}, \quad (3)$$

式中, $E_{\text{elec}} = 50 \text{ nJ} \cdot \text{bit}^{-1}$, $\epsilon_{fs} = 100 \text{ pJ} \cdot (\text{bit} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$ [9]. 根据以上假设, 计算节点的能耗期望, 模型如图 3 所示.

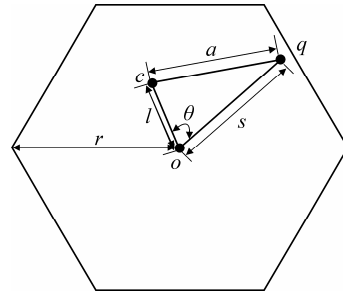


图3 最佳位置模型

从图 3 可知, 节点 c 离中心点较近, q 点远离中心点较远, 通过三角形余弦定理可以得出节点 c 到 q 点的欧式距离 a 为:

$$a = \sqrt{s^2 - 2\cos\theta \cdot s \cdot l + l^2}, \quad (4)$$

式中, l 和 s 分别是中心点到各自节点的距离; 因此假设节点 c 是簇头节点, 根据(4)式, 节点 q 发送数据包给簇头节点 c 所需的能量 E 为:

$$E_{TX}(k, d) = kE_{\text{elec}} + k\epsilon_{fs}(s^2 - 2\cos\theta \cdot s \cdot l + l^2).$$

根据节点分布概率 p , q 点区域出现节点的概率为 $p_i \cdot \Delta s \cdot s \cdot \Delta\theta$, 由于正六边形组成的蜂窝结构能够更好地覆盖整个监测区域, 节点 c 消耗能量的期望可以近似考虑成以 r 为边长, 六边形中心点为圆心的外接圆, 由此推出簇头节点能量消耗期望如下:

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \sum_{\substack{\Delta s \rightarrow 0 \\ \Delta\theta \rightarrow 0}} \rho \cdot \Delta s \cdot s \cdot \Delta\theta \left[k \cdot E_{TX} + k \cdot \epsilon_{fs} \cdot (s^2 - 2\cos\theta \cdot s \cdot l + l^2) \right] \\ &= \rho \cdot k \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^r [E_{TX} + \epsilon_{fs} \cdot (s^2 - 2\cos\theta \cdot s \cdot l + l^2)] s ds d\theta = \\ &= \rho k E_{TX} \pi r^2 + \rho k \epsilon_{fs} \frac{\pi}{2} r^4 + \rho k \epsilon_{fs} \pi r^2 l^2. \end{aligned} \quad (5)$$

从(5)式可以看出, 节点能量消耗的期望与距离 l 成正比关系, 即距离中心节点越远, 节点消耗

的能量越多. 因此应该尽可能选择距离中心点近

2.2 虚拟区域转换机制

根据簇头位置分析证明, 选择距离中心点近的节点作为簇头可以节省通信能量消耗, 然而由于节点的分布是均匀随机的, 在目标跟踪监测应用中, 我们同样也需要边界节点. 与此同时, 中心节点如果一直担任簇头的角色将会花费大量的能耗而导致能量耗尽死亡, 网络失效. 针对以上问题, L-GAF 算法提出定期动态划分虚拟区域思想. 如图 4(a)中, 节点 q 离中心点 o 较远, 担任簇头的概率较低, 但是可经过分别以(A1, A3, A5 或者 A2, A4, A6)为正六边形中心点进行区域重新划分. 如图(b)所示, 经过 period I 转换, 节点 q 离中心点较近, 成为簇头的概率加大, 节点通信能耗减少.

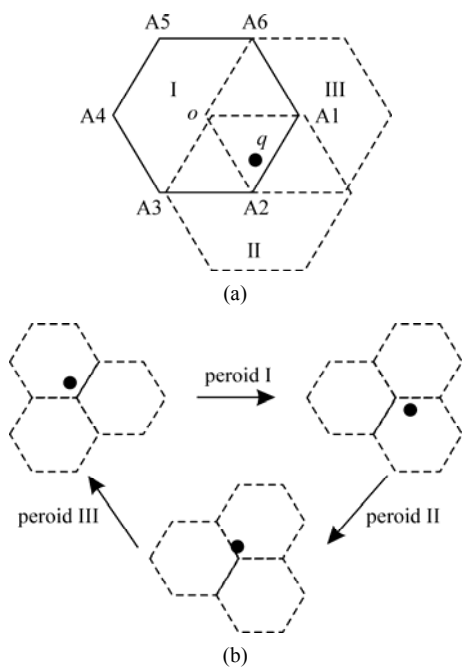


图 4 动态簇转换机制

由图 4(b)可知, 周期性动态转换虚拟网格, 经过 3 个周期能循环重复 1 次改变. 节点 q 被选为簇头节点的概率可能性变大. 用数学模型表示如下:

(1) 当 $k \% 3 = 1$, 在 T_k 时期, 节点采用模式 I (period I) 进行转换, 即以(A1, A3, A5)为网格中心点进行划分, 如图 4(a)中 III.

(2) 当 $k \% 3 = 2$, 在 T_k 时期, 节点采用模式 II (period II) 进行转换, 即以(A2, A4, A6)为网格中心点进行划分, 如图 4(a)中 II.

(3) 当 $k \% 3 = 0$, 在 T_k 时期, 节点采用模式 III (period III) 进行转换, 即恢复初始划分图 4(a) I.

其中, T_k 表示网络分簇进行的轮次; 采用如上所述的转换模式需要有精确的时间同步要求, 并且经过这样的转换即可均衡节点的能量消耗.

3 簇头选举策略分析

3.1 节点度形成

节点度是指所有距离该节点一跳距离的邻居节点的数目. 节点以相同发射半径 R 发射 Call 消息, 消息中包含节点自身 ID、所属区域 GropID, 收到 Call 消息的节点回复发送节点一个同样含有自身 ID、GropID 的 Answer 消息, 节点通过统计 Answer 消息的数量, 确定节点度大小, 并记为 n , 保存在 table_node 数据库中.

3.2 簇头选举机制

由于通信距离是影响节点通信能耗的最主要因素, 因此随着距离的增加, 通信能耗急剧上升. 通过动态转换虚拟单元格后, 中心节点成为簇头的概率加强, 并且按照最大节点剩余能量原则, 选取能量较高的节点作为簇头, 所以此时网络运行节点的能耗大大减小. 然而选取的簇头周围节点数目可能较少, 经过若干通信周期后, 可能出现簇头周围节点由于承担过多通信转发工作而消耗过多能量并率先失效, 最终导致某区域失效及网络失效. 因此在 L-GAF 算法中同时添加节点度策略, 节点度越大, 担任中转任务节点越多, 信息到达簇头概率提升, 减了少信息中途丢失可能性.

算法执行过程中, 节点进入发现状态后, 动态更新自己及邻居的剩余能量值, 同时静态的存储节点到其所在单元区域的中心点的距离 k .

结合以上三点改进工作, 提出一种节点被选为簇头节点的概率 p 的计算公式:

$$p = \frac{n}{N} p_0 + \frac{E_{\text{剩}}}{E_{\text{总}}} p_1 + \frac{E_{\text{剩}}}{d_k^\alpha} p_2, \quad (6)$$

式中, p_0, p_1, p_2 为正的常系数且 $p_0 + p_1 + p_2 = 1$; α, β 是最佳位置选择的权重系数; $E_{\text{剩}}$ 为节点的剩余能量值; $E_{\text{总}}$ 为节点能量的初始值; N 为分布节点总数; d_k 为节点到其所在区域中心点的距离; n 是临节点一跳距离的节点数(即节点度). 从(6)式可以明显看出, 节点成为簇头概率 p 跟节点自身的剩余能量、

节点度以及节点距离中心点位置有关。进入发现状态后, 节点广播信息, 当邻居节点的概率 p 都比自身概率小时, 该节点将会发送消息给虚拟簇内的其余节点, 告诉它们簇头节点产生, 其余节点就自动转向睡眠状态。

4 实验仿真

实验采用 Matlab 作为实验仿真平台, 仿真场景及相关参数设定见表 1。

表 1 实验参数名称及参数值

参数名	参数值	参数名	参数值
仿真区域/m ²	100×100	接收数据能耗/(nj·bit ⁻¹)	50
节点数/个	500	发送数据能耗/(nj·bit ⁻¹)	50
发送数据/Byte	200	数据处理能耗/(nj·bit ⁻¹)	25
监听能耗/W	6×10 ⁻⁶	睡眠能耗/W	3×10 ⁻⁶

4.1 节点能耗测试与分析

在表 1 所述的场景下, 分别对 GAF 和 L-GAF 算法进行仿真实验, 随机选择其中的 200 轮次, 并求其平均值, 结果如图 5 所示。

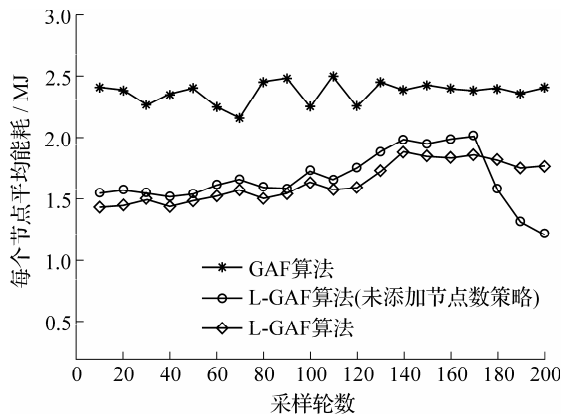


图 5 节点能耗

由图 5 可知, GAF 算法平均节点能耗较大, 这是因为 GAF 算法采用随机数选取簇头, 节点的能耗不均, 同时边界节点成为簇头节点后能耗增加。在未添加节点度策略的 L-GAF 算法中, 第 170 轮后节点能耗急剧下降, 由于节点能耗不均, 某些临近簇头的节点由于负担过大导致死亡, 网络节点的平均能耗降低。L-GAF 算法节点能耗低并且能耗均衡, 延长了网络的生命周期。

4.2 网络负载均衡测试与分析

网络负载均衡由负载均衡因子(LBF)来判断:

$$L_{LBF} = \frac{c_num}{\sum_{i=1}^{c_num} (x_i - n)^2}, \quad (7)$$

式中, c_num 为簇头节点数; x_i 为簇头节点 i 的邻居节点数; n 为本轮簇头的平均邻居节点数。由(7)式可知, LBF 越大, 网络的负载均衡程度越好。

同上所述场景, 分别进行 GAF、L-GAF 算法仿真, 随机选择其中的 10 轮, 结论如图 6 所示。

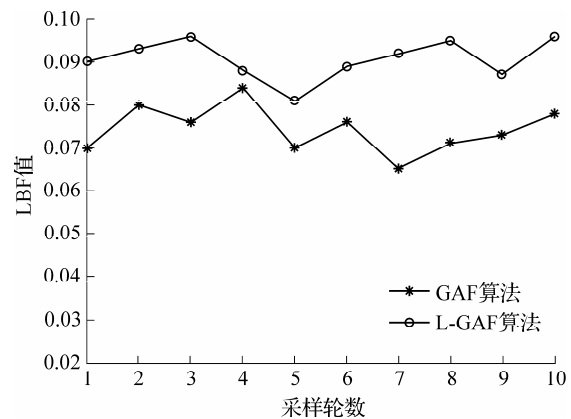


图 6 网络负载均衡

在抽取的 10 轮中, 这 2 种算法的负载均衡因子都出现不同程度的波动。这是因为 GAF 算法随机选取簇头节点, 而 L-GAF 算法每轮都要对监测区域虚拟网格重新划分, 使簇头节点位于网格中心, 并按最大剩余能量原则和节点度策略选取簇头。这些因素都会影响簇头数目、邻居节点数目和本轮平均邻居节点数。

由图(6)可知, 在上述 2 种算法中, 负载均衡性 $L_{L-GAF} > L_{GAF}$ 。因为 GAF 随机选取簇头, 簇头间距离相隔很远, 发送数据能耗过大, 导致过早节点失效。而 L-GAF 按簇头近于网格中心点、最大剩余能量原则和节点度策略选取簇头, 均衡了能量的消耗。因此 L-GAF 算法的负载均衡性比 GAF 算法的性能优越。

5 结论

针对 GAF 算法在性能上存在的不足, 提出一种最佳位置簇头选举策略方案。通过数学模型证明了在一定条件下节点距网格中心点越远, 节点能耗越大问题。通过实验仿真表明, 本文提出的 L-GAF 算法不仅能够均衡节点的能耗, 实现低能耗通信, 还有利于网络负载均衡, 提高了网络的性

能。但是其在仿真中负载平衡因子还出现较大的波动,仍需要对动态虚拟单元格转化策略进行性能和权重参数等方面的优化。

参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks[C]. IEEE Communications Magazine, 2002.
- [2] Eschenauer L, Gligor V D. A key-management scheme for distributed Sensor Networks[C]. Proceedings of the 9th ACM Conference on Computer and Communication Security, ACM Press, USA, New York, 2002:41-47.
- [3] 李冰, 李捷. 一种基于 GAF 的无线传感器网络分簇算法[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(12):113-115.
- [4] Qi Xiaogang, Qiu Chenxi. An improvement of GAF for lifetime elongation in wireless sensor networks[J]. Journal of Convergence Information Technology, 2010, 5 (7):112-119.
- [5] 张重庆, 李明禄, 伍民友. 数据收集传感器网络的负载平衡网络构建方法[J]. 软件学报, 2007, 18(10):1111-1112.
- [6] 陈祖爵, 欧阳烨龙. 一种层次蜂窝结构的负载均衡 GAF 算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(3):104-106.
- [7] Xu Ya, Heidemann J, Estrin D. Geography-informed energy conservation for AdHoc routing [C]. Proc of the Seventh Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Net-working (ACM Mobicom), Italy, Rome, 2001:70-84.
- [8] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application specific protocol architecture for wireless micro-sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4):660-670.
- [9] Rishi Ranjan. Generic architecture for power-aware routing in wireless sensor networks[D]. Georgia: School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology, 2004.

Research on Scheduling Algorithm with Energy Efficiency of Wireless Sensor Network Node

XU Ping, ZENG Xing-bin*, HE Jia-ming

(Faculty of Information Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In wireless sensor networks, the GAF algorithm based on clustering of node location is introduced to effectively save node energy in some cases. However, the traditional GAF algorithm does not make full use of node energy since it selects cluster head randomly, and neither does it consider the optimal location based on distribution of the cluster head. The paper proposes a new algorithm of L-GAF. The main idea of the new algorithm is to find cluster head node with the best location, and convert virtual cell periodically and dynamically, as well as change distance of the node and center. It keeps balance of energy distribution by using strategy of node degree and election mechanism of residual energy. Compared with GAF algorithm, the new algorithm proposed in the paper not only extends lifetime of network, but also strengthens the load capacity of network.

Key words: wireless sensor network; GAF algorithm; virtual cell; node degree

(责任编辑 章践立)