

WSN 中一种高效节能的分簇路由协议*

程焱芳, 吴玉成

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044)

摘要: 针对传感器网络存在的节点能耗过快问题, 提出了一种新的分簇路由协议 EEGC。该协议底层拓扑采用分簇及簇内部分覆盖算法, 有效地降低了网络能耗。上层拓扑采用近簇头单跳通信、远簇头多跳通信的方式, 缓解了内环簇头能耗过快的问题。同时, 以簇头剩余能量决定簇及簇间路由的重构, 进一步提高了控制消息的效率。仿真验证表明, EEGC 协议的网络寿命明显优于 LEACH。

关键词: 无线传感器网络; 能量控制; 分簇算法; 覆盖算法; 能量洞

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)13-0045-04

An energy-efficient clustering routing protocol for wireless sensor networks

Cheng Yanfang, Wu Yucheng

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Considering the efficiency of energy consumption in wireless sensor networks, in this paper, a new clustering routing protocol EEGC is proposed. It saves the energy by clustering and the cluster coverage algorithm on the bottom level. Then on the top level, message is transmitted in single-hop when cluster-head was near the sink node and in multi-hop when cluster-head is far away from the sink node, which could relieve the problem that cluster heads closer to the sink node tend to die earlier. Furthermore, cluster formation and data transmission are based on the remaining energy of cluster-head. Simulation results show that the new routing protocol provides longer lifetime and higher reliability than LEACH routing protocol.

Key words: WSN; energy-efficient; clustering algorithms; coverage algorithms; energy hole

节能问题一直是无线传感器网络 WSN (Wireless Sensor Network) 的研究热点, 其中基于分簇的路由协议引起了较多的关注^[1-2]。分簇协议一般采用多跳通信, 但是研究发现, 多跳通信会导致离 Sink 越近的传感器节点的能量消耗越快^[3], 这种现象导致在 Sink 周围形成“能量洞”。参考文献[4]首次提出能量洞问题在节点随机均匀分布的环境中是不可避免的。同时, 从延长网络生命周期和网络覆盖率的角度考虑, 参考文献[5]重点讨论了部分覆盖算法, 指出恰当的部分覆盖可以减少冗余节点, 更节省网络能量。

针对上述问题, 本文提出了一种新的分簇算法 EEGC, 该算法主要针对节点同构、节点随机均匀分布的网络环境。EEGC 采用基于最小跳数的簇头竞争方法、

内环簇头直接通信以及外环簇头多跳通信的方式, 缓解了网络 Sink 节点周围能量洞的问题。同时调用部分覆盖算法, 避免了大量冗余节点的能耗, 实现了一个高效的节能通信网络。

1 系统模型和问题分析

1.1 系统模型

本文假设 n 个传感器节点随机均匀地分布在监测区域 A_{area} 内, 节点具有相同的初始能量和能耗模型。基站部署在区域外, 由位于监测区域内的 Sink 节点将收集的信息传送到基站。所有节点不具有定位功能, 节点的无线发射功率可控, 可以根据距离来调整发射功率的大小。无线传感器网络的能耗主要来自于通信, 所有节点发送、接收和融合数据消息的能量消耗模型见参考文献[1]。

1.2 簇内部分覆盖算法

定义 1 服务质量 q (the Desired QoS) 定义为所有

* 基金项目: 国家自然科学基金(60872038); 中国博士后基金(20090450787); 重庆市教委科技项目(KJ08A09); “211 工程”创新人才培养计划(S-09102)

网络与通信

Network and Communication

工作节点构成的有效监测区域面积占整个监测区域 A_{area} ($L \times L$) 面积的比例, 即:

$$q = \left(\bigcup_{i=1}^K S_i \right) \cap A_{\text{area}} / A_{\text{area}} \quad (1)$$

其中, S_i 表示工作节点 n_i 的感知范围, K 表示工作节点的数量。区域 A_{area} 中任意一点 $P_i(x, y) \in A_{\text{area}}$, $P_i(x, y)$ 没有被 K 个工作节点覆盖的概率为:

$$p[\bar{A}/A_{\text{area}}] = (1 - S_i/A_{\text{area}})^K \quad (2)$$

因此, 在区域 A_{area} 中, 任意一点 $P_i(x, y)$ 至少被其中一个工作节点覆盖的概率 θ 为:

$$\theta = 1 - p[\bar{A}/A_{\text{area}}] = 1 - (1 - S_i/A_{\text{area}})^K \quad (3)$$

根据服务质量 q 的定义, 可知在区域 A_{area} 中 K 个工作节点达到的服务质量为:

$$q = \theta = 1 - (1 - S_i/A_{\text{area}})^K = 1 - (1 - \pi R_s^2/A_{\text{area}})^K \quad (4)$$

其中, R_s 为感知半径。由式(4)可知, 随机部署网络在区域大小和感知半径已知的情况下, 满足服务质量 q 要求最少需要选取 K 个工作节点:

$$K = \ln(1-q) / \ln(1 - \frac{\pi R_s^2}{A_{\text{area}}}) \quad (5)$$

1.3 最佳簇半径

在 EEGC 协议中, 梯度建立阶段网络耗能固定, 簇的构造和簇间路由选择两部分的耗能与簇的“死亡”相关。综上考虑, 本协议中实现网络节能的关键是使所有节点在数据传输阶段每次传送消息耗能最低。

针对节点随机均匀分布的网络, 参考文献[6]给出了网络分簇数的期望值 $k_{\text{exp}} = 4A_{\text{area}} / (3\sqrt{3} R_c^2)$ (R_c 为簇半径)。因此, 理想情况下可假设簇是一个期望面积为 $3\sqrt{3} R_c^2/4$ 的圆, 则 $\rho = 4/3\sqrt{3} R_c^2$, 得:

$$E[d_{\text{toCH}}^2] = \iint (x^2 + y^2) \rho(x, y) dx dy = \iint r^2 \rho(x, \theta) r dr d\theta = \frac{4}{3\sqrt{3} R_c^2} \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{\sqrt{\frac{3\sqrt{3} R_c^2}{4}}} r^3 dr d\theta = \frac{9}{8\sqrt{3} R_c^2} \quad (6)$$

因此, 成员节点每传输 L 比特感知数据耗能为:

$$E_{\text{member}} = lE_{\text{elec}} + l\epsilon_{\text{fs}} d_{\text{toCH}}^2 = lE_{\text{elec}} + l\epsilon_{\text{fs}} \frac{9R_c^2}{8\sqrt{3}\pi} \quad (7)$$

簇头节点的能耗主要包括两部分: 接收、融合成员节点和孩子的数据消息, 以及向父节点传送数据。因此, 簇头节点每传输 L 比特数据消息的耗能为:

$$E_{\text{CH}} = (k_{\text{act}} - 1)lE_{\text{elec}} + N_{\text{child}}lE_{\text{elec}} + (k_{\text{act}} + N_{\text{child}})lE_{\text{DA}} + (lE_{\text{elec}} + l\epsilon_{\text{fs}}d_{\text{up}}^2) \quad (8)$$

其中, $N_{\text{child}}=1$ 是指每个簇头节点的孩子节点数, $k_{\text{act}}=K/k_{\text{exp}}$ 表示每个簇的工作节点数。

为保证网络全连通, 采用簇间广播半径 $d_{\text{up}}=3R_c$ 。因此整个网络每传送 L 比特数据信息消耗的能量为:

$$E_{\text{total}} = k_{\text{exp}}E_{\text{CH}} + (K - k_{\text{exp}})E_{\text{member}} = 2KlE_{\text{elec}} + (K + k_{\text{exp}})lE_{\text{DA}} + k_{\text{exp}}l\epsilon_{\text{fs}}d_{\text{up}}^2 + (K - k_{\text{exp}})l\epsilon_{\text{fs}}d_{\text{toCH}}^2 = \frac{4AlE_{\text{DA}}}{3\sqrt{3} R_c^2} + \frac{9Kl\epsilon_{\text{fs}}R_c^2}{8\sqrt{3}\pi} + Kl(2E_{\text{elec}} +$$

$$E_{\text{da}}) + (4\sqrt{3} - \frac{1}{2\pi})Al\epsilon_{\text{fs}} \quad (9)$$

对簇半径 R_c 求导, 得:

$$\frac{d(E_{\text{total}})}{d(R_c)} = \frac{18Kl\epsilon_{\text{fs}}R_c}{8\sqrt{3}\pi} - \frac{8AlE_{\text{DA}}}{3\sqrt{3}R_c^3} \quad (10)$$

将式(5)代入式(10), 并令求导结果等于 0, 可得最优簇半径为:

$$R_c = 2\sqrt[4]{\frac{2\pi A_{\text{area}} E_{\text{DA}}}{27K\epsilon_{\text{fs}}}} = 2\sqrt[4]{\frac{2\pi A_{\text{area}} E_{\text{DA}} \ln(1 - \pi R_s^2/A_{\text{area}})}{27\epsilon_{\text{fs}} \ln(1-q)}} \quad (11)$$

2 EEGC 协议

系统初始化, 所有传感器节点都有唯一 ID 号, 依次为 1、2、3…… n , 梯度初始值为无穷大。Sink 节点 ID 号为 0, 梯度为 0。表 1 列出了所有广播消息以及其相应的描述信息。

表 1 状态和消息描述

| 消息 | 描述 |
|-----------|--|
| Hello | Tuple(ID, gradient, residual energy) |
| Head | Tuple(ID, s(i).t, residual energy,) |
| Join_head | Tuple(selfid, headid, residual energy) |
| Child | Tuple(ID, gradient, residual energy) |

2.1 梯度的建立

梯度生成阶段, 所有节点接收半径 R_c 内的梯度广播消息, 确定自身的梯度值, 并记录相邻节点的梯度值、能量状态和 ID 号。

(1) 首先, Sink 节点以半径 R_c 广播 Hello 消息。其他节点 i ($1 \leq i \leq n$) 收到广播信息后, 按照步骤(2)进行操作。

(2) 高梯度节点接收半径 R_c 内其他节点的 Hello 消息, 根据广播节点的梯度值大小修改自身的梯度。例如, 节点 i 收到节点 j 发送的 Hello 消息, 保存节点 j 的消息信息。如果节点 i 的梯度大于节点 j 的梯度, 则节点 i 修改自身梯度 $G_i = G_j + 1$, 并以半径 R_c 广播 Hello 消息; 否则, 不修改自身梯度值。所有节点重复进行步骤(2), 直到时间 t_g 结束。

(3) t_g 时刻之后, 节点将存在获得梯度和未获得梯度两种状态。对于未获得梯度的任意节点 i ($1 \leq i \leq n$), 需要增大自己的发射半径发送 Hello 消息, 以使距离最近的低梯度节点 j 接收到该信息。然后节点 i 根据节点 j 的响应消息修改自身梯度 $G_i = G_j + 1$, 并根据接收信号的强度, 调整发射功率, 缩小冲突范围。最后, 节点 i 向邻域内其他节点广播自己的新梯度信息, 网络内所有节点的梯度建立完成。

2.2 簇的形成

在簇头选择阶段, 每个节点根据存储的邻域节点能量值和梯度值, 利用式(12)计算 t 值, 并在时刻 t 以半径 R_c 广播 Head 消息竞争簇头。

$$t = T \times \frac{E_{\text{ava}} \times E_{\text{max}}}{E_i^2} \times \frac{G_i}{G_{\text{ave}}} \quad (12)$$

网络与通信

Network and Communication

其中, $E_{ava} = \left(\sum_{i=1}^{k'} E_i \right) / k'$, $G_{ave} = \left(\sum_{i=1}^{k'} G_i \right) / k'$ 。 E_i 、 G_i 分别表示

节点的剩余能量和梯度, E_{max} 是节点初始能量, T 是规定的簇头竞争算法持续时间。

如果某个节点在时刻 t 之前收到其他节点的簇头广播 Head 消息, 则节点不再广播 Head 消息, 直接发送 Join_head 消息加入该簇。若节点同时收到两个簇头广播 Head 消息, 则加入能量较大的那个簇。如果在 T 时刻后, 节点还未收到簇头声明 Head, 则自己广播簇头声明 Head, 宣布成为簇头。

2.3 数据传输

根据簇内覆盖算法, 簇头计算出簇内工作节点数 $k_{act} = K/k_{exp}$, 簇头选择能量较大的 $k_{act}-1$ 个成员节点, 创建一个 TDMA 时隙调度, 并把该 TDMA 调度广播给这 $k_{act}-1$ 个节点。这 $k_{act}-1$ 个节点在所分配的时隙将监测数据发送到簇头, 簇内其他节点进入休眠模式。

若簇内工作节点 i 能量耗尽, 则簇头关闭该工作节点, 并调用能量较大的休眠节点 j 工作, 安排节点 j 在节点 i 的时隙发送信息。若簇头节点的能量小于 E_{Clmin} , 则重新竞选簇头, 每个非死亡节点在半径 R_c 内广播自身能量和梯度值, 然后重复 2.2 和 2.3 的步骤。簇头节点能量阈值 E_{Clmin} 为接收、融合簇内工作节点的数据消息, 以及发送数据消息损耗的能量, $E_{Clmin} = (k-1)E_{elec} + kE_{DA} + (E_{elec} + lE_{sig}d_{up}^2)$ 。对于每个簇, 重复进行多次簇内和簇间数据传输, 直到簇头的剩余能量不足以维持一次数据传输过程时, 才重新竞选簇头, 这样可以有效地提高每次分簇的效率。

簇间数据传输阶段, 每个簇头在 $3R_c$ 半径内广播 Child 消息。内环所有簇头 $i(G_i \leq 3)$ 直接发送数据消息给 Sink 节点。外环簇头 $i(G_i > 3)$ 存储接收到的 Child 消息, 同时选择 E_j/G_j 比值较大的低梯度簇头 j 作为父节点, 进行数据多跳传输。如果一条路径失败, 则选择 $3R_c$ 范围内的其他簇头节点作为父节点, 进行簇间信息传递。只有当网络内所有节点重新进行簇的构建过程, 网络才会重新广播 Child 消息构建簇间路由, 否则, 所有簇头节点依照储存的路由表传递数据。这种内环簇头直接通信、外环簇头多跳通信的方式, 能够减少内环簇头的负载, 缓解内环节点能耗过快的问題。

3 实验验证与仿真

为了说明算法效果, 使用 MATLAB 对算法进行了仿真测试, 仿真区域 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$, 仿真场景参数如表 2 所示。

3.1 生命周期

图 1 比较了 LEACH 和 EEGC 协议在不同的节点分布密度下的网络寿命期望值。由图 1 可见, 针对不同的节点分布密度, EEGC 协议的网络寿命均优于 LEACH。在 LEACH 协议中, 随着节点分布密度的加大, 网络内冗

表 2 仿真参数

| 参数 | 场景 |
|-----------|---------------------------------------|
| 节点数 n | 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 |
| Sink 坐标 | (50, 75) |
| 初始能量 | 0.5 J |
| 通信半径 | R_c |
| 感知半径 | $R_s = 20$ |
| 数据包长 | 6 400 B |
| 广播包长 | 200 B |
| E_{dec} | 50 nJ/bit |
| E_s | 10 nJ/bit/m ² |
| E_{amp} | 0.001 3 pJ/bit/m ⁴ |
| E_{DA} | 5 nJ/bit/signal |
| d_0 | $E_R/E_{amp} \approx 87.7 \text{ m}$ |

余节点越来越多, 网络寿命随着节点分布密度的加大而逐渐降低。而由于 EEGC 协议采用了部分覆盖算法, 有效调动活动节点, 在服务质量 $q=0.90$ 和 $q=0.99$ 两种情况下, 网络寿命随着节点分布密度的加大而延长。由图 1 可以明显看出, EEGC 在延长网络寿命方面比 LEACH 协议优秀。

图 2 比较了 EEGC 协议在不同的服务质量 QoS 下的网络寿命, 选取的仿真节点数目 $n=100$ 。由图 2 可见, 网络寿命随 QoS 的提高而降低, 这是由于系统内单位时间内要求保持工作状态的节点减少了, 单位时间内的耗能地减少了。

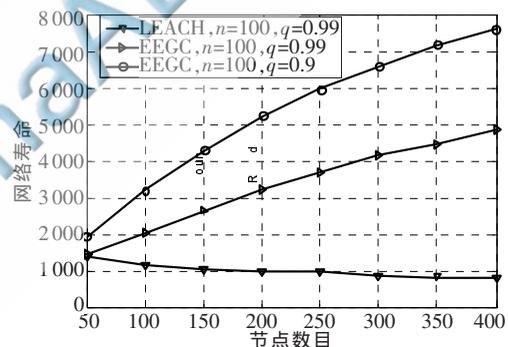


图 1 网络寿命随节点数目变化曲线

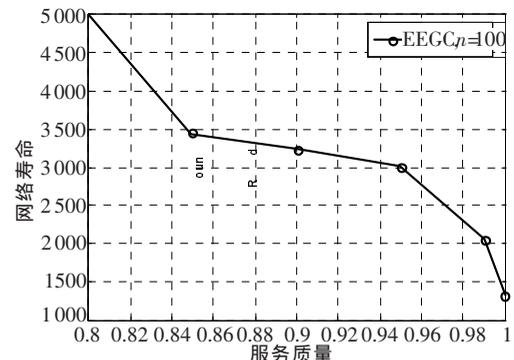


图 2 网络寿命随服务质量变化曲线

3.2 协议性能

图 3、图 4 分别比较了 EEGC 协议在 $n=100$ 、 $q=0.99/0.90$ 以及 $n=400$ 、 $q=0.99/0.90$ 场景下, 网络寿命与每轮

网络与通信 Network and Communication

工作节点数目的关系。由图可见,在 $q=0.99$ 条件下,网络要求更多工作节点来换取较小的 QoS 优势。

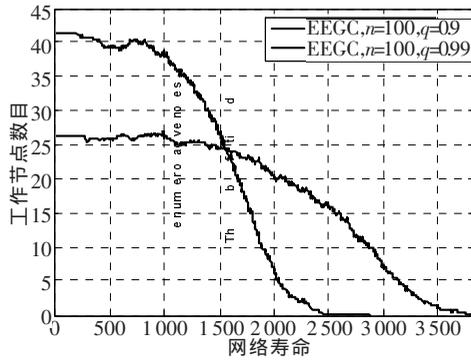


图3 网络寿命 VS.工作节点数目($n=100$)

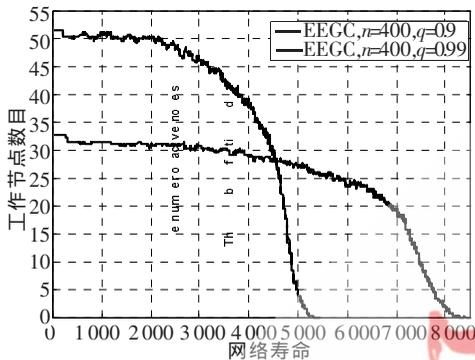


图4 网络寿命 VS.工作节点数目($n=400$)

图5比较了EEGC协议和LEACH在 $n=100$ 条件下的实际网络服务质量。图6比较了EEGC协议与LEACH在 $n=400$ 条件下的实际网络服务质量。

图5和图6均可表明EEGC协议在保证高服务质量的同时,网络寿命更长。同时,比较EEGC协议在 $q=0.99$ 、 $n=400$ 与 $q=0.99$ 、 $n=100$ 两种情况的曲线图可知,EEGC协议在高密度环境下的网络能耗更加均衡,网络服务质量更高,也验证了EEGC协议主要是针对高密度的随机分布网络环境。

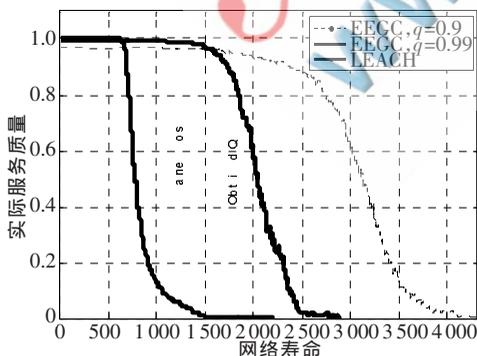


图5 网络寿命 VS.实际服务质量($n=100$)

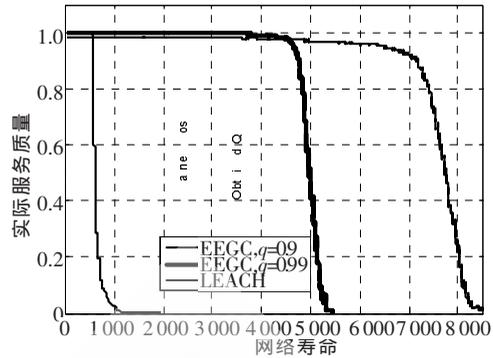


图6 网络寿命 VS.实际服务质量($n=400$)

效减少了冗余节点。同时,簇和簇间路由的重构都由簇头剩余能量值决定,在高能量、高密度的网络中,这样可以降低反复重新构建簇及路由的能量损耗;但是在低能量、节点稀疏的网络,这种网络重构机制在节能方面并无优势。同时,本协议的空分路由策略——内环直接通信、外环多跳通信,还有待改进。下一步需要研究更合理的拓扑机制,进一步节省系统能耗,延长网络寿命。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 沈波,张世永,孙亦平.无线传感器网络分簇路由协议[J].软件学报,2006,17(7):1588-1600.
- [3] 宋超,刘明,龚海刚,等.基于蚁群优化解决传感器网络中的能量洞问题[J].软件学报,2009,20(10):2729-2743.
- [4] OLARIU S, STOJMENOVIC I. Design guidelines for maximizing lifetime and avoiding energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting[C]. Proceedings of the IEEE INFOCOM'06. Barcelona, Spain: IEEE Press, 2006-04-06-25.
- [5] Zou Yi, CHAKRABARTY K. A distributed coverage and connectivity-centric technique for selecting active nodes in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 54(8):978-991.
- [6] 毛莺池,刘明,陈力军,等.DELIC:一种高效节能的与节点位置无关的传感器网络覆盖协议 [J]. 计算机研究与发展,2006,43(2):187-195.

(收稿日期:2011-03-13)

作者简介:

程焱芳,女,1985年生,硕士研究生,主要研究方向:无线通信技术。

吴玉成,男,1971年生,博士,教授,主要研究方向:无线通信技术。

EEGC协议采用了部分覆盖算法调度活动节点,有