

WSN 中能量有效的多簇头层次型路由协议*

吕金鹏, 赵泽茂, 邓淑华

(杭州电子科技大学 密码与信息安全研究所, 杭州 310018)

摘要: 为改善无线传感器网络中某些节点因能耗太大而过早失效的情况, 提出了一种基于分簇的多簇头能量有效算法 EHMVA (energy-efficient hierarchical multiple vice-cluster-head algorithm)。在簇头选择机制中引入邻节点距离的概念, 采用多副簇头选举分担主簇头能耗的机制, 通过发现联节点和引入误差发送机制来减少数据发送, 并通过延长稳定的簇通信时间来降低簇重建的频率。仿真实验表明, 该算法有效地平衡了节点间的能量消耗, 显著地延长了网络的存活时间。

关键词: 无线传感器网络; 能量有效; 副簇头; 邻节点距离; 联节点; 误差发送

中图分类号: TP393.08 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)05-1863-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.05.070

Energy-efficient multi-cluster head hierarchical routing protocol in wireless sensor networks

LV Jin-peng, ZHAO Ze-mao, DENG Shu-hua

(Cryptography & Information Security Institute, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To ameliorate the situation that some nodes die too early due to the uneven energy consumption in wireless sensor networks, this paper proposed the energy-efficient hierarchical multiple vice-cluster-head algorithm in wireless sensor networks (EHMVA), which introduced the concept of neighbor distance in the cluster head selection mechanism, used vice-cluster-head mechanism to share the energy consumption of primary cluster-heads, added the concept of link-nodes, sent data according to the errors and extended the stable cluster communication phases to reduce the frequency of cluster reconstruction. Simulation results demonstrate that the energy consumption is more even in EHMVA so as to prolong network lifetime effectively.

Key words: wireless sensor networks; energy-efficient; vice-cluster-head; distance of neighbors; link-nodes; discarding duplicate sending

0 引言

无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSN) 是由部署在监测区域内的大量传感器节点组成, 通过无线通信形成一个多跳的自组织的网络系统, 其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中被感知对象的信息, 并发送给观察者。随着研究的深入, WSN 能够广泛应用于国防军事、国家安全、环境监测、交通管理、医疗卫生、制造业、反恐抗灾等领域, 具有非常广阔的应用前景和很高的应用价值^[1,2]。传感器节点通常携带能量十分有限的电池, 而其部署区域环境复杂, 有些区域甚至人员不能到达, 所以传感器节点通过更换电池的方式来补充能源是不现实的。如何高效使用能量来最大化网络生命周期是传感器网络面临的首要挑战。

在无线传感器网络体系结构中, 网络层的路由技术至关重要。目前提出的无线传感器网络路由协议主要有两类, 即平面路由协议和层次路由协议。由于平面路由协议需要维持较大的路由表, 占据较多的存储空间, 因而并不适合在大规模无线传感器网络中采用。层次路由协议可以在一定程度上解决这个问题。

文献[1]提出的低功耗自适应分簇 (low energy adaptive clustering hierarchy, LEACH) 协议是当前典型的分簇算法。LEACH 协议采用分层的簇型结构、本地数据联合处理和簇头节点动态分配来实现网络中的能耗均衡, 但它没有考虑节点的剩余能量、簇头的分布, 有节点传输能耗大、簇头分布不均、节点通信距离大、单跳传输造成能耗不均、网络生存时间短、负载均衡程度低、不利于网络的扩展等缺陷。文献[2]针对簇头分布不均、节点间通信距离过大、交互控制信息过多的问题, 提出 EEHRP, 该协议在组簇期间根据节点的剩余能量信息, 为其设置不同的簇头通告时延, 节点无须广播大量消息, 形成的簇头分布也较为均匀; 在路由算法中引入了网关节点, 簇头通过网关转发数据, 能够有效避免簇头远距离传送数据造成的能耗过多而成为网络瓶颈。文献[3]提出了一种基于分簇的无线传感器网络数据汇聚传送协议 CDAT, CDAT 通过均衡能耗的分簇方法及数据预测传送机制, 可以有效延长网络的生命期。文献[4]提出的改进算法 LEACH-EDH 考虑了节点的能量和地理位置, 在传输阶段, 采用了基于概率的混合路由算法。文献[5]提出了 LEACH-DCHS 算法, 把能量作为当选簇头节点的一个参数, 每轮选举中选择能量相对较高的节点作为簇头节点, 综合考虑了节点能量和阈值大小对簇头选举的影响, 使算法较

收稿日期: 2011-09-01; **修回日期:** 2011-10-16 **基金项目:** 浙江省自然科学基金资助项目 (Y1100818)

作者简介: 吕金鹏 (1985-), 男, 浙江嵊州人, 硕士研究生, 主要研究方向为 WSN 路由协议、密码学 (lvjinpeng3@163.com); 赵泽茂 (1965-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为密码学、信息安全; 邓淑华 (1985-), 男, 江西抚州人, 硕士研究生, 主要研究方向为密钥管理、密码学。

为公平合理。文献[6]基于 LEACH-DCHS 算法,通过延长网络稳定通信时间,同时兼顾网络中节点能量的均匀消耗,来达到节省能量的目的。

本文在研究各种协议及其改进协议的基础上,针对分簇协议中簇头负载过重的问题,提出了一种多副簇头分担簇头能耗的能量有效层次型路由协议 EHMVA(energy-efficient hierarchical multiple vice-cluster-head algorithm),仿真实验表明,该算法能有效均衡节点能耗、提高网络生存时间。

1 协议策略描述

1.1 网络模型

本文假设 N 个无线传感器节点随机、均匀地部署在一个 $l \times l$ 的二维方形区域 A 内,该传感器网络具有以下性质:

- a) 无线传感器网络为静态网络,节点部署后不再移动;
- b) 节点采用布尔感知模型,节点的感知半径为 r ,且忽略边界因素影响;
- c) 唯一的基站部署在区域 A 以外的一个固定位置,具有强大的能量和计算能力;
- d) 节点构造相同且具有相等有限的初始能量值;节点能量进行功率控制,可调节发送功率和范围;节点始终有数据发送,且相邻节点数据高度相似,对基站来说是冗余的;
- e) 每个传感器都有一个最大传输距离,用 t_m 表示,假设它比离 sink 节点最远的传感器节点到 sink 节点的距离还小很多;
- f) 为了简化起见,假设所有传感器节点在每个单位时间内生成并发送 L bit 的数据。

对目前先进的无线设备和低功率的计算设备来说,这些假设都是成立的。

定义 无线传感器网络节点在 A 区域内随机均匀分布,很可能出现多个节点在地理位置上非常接近,当节点距离小于 d_m (由传感器节点精度和网络密度决定) 时,称之为联节点,如图 1 所示。

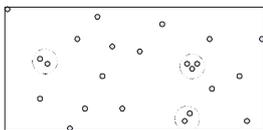


图1 A区域中部分随机分布的节点

由于联节点非常接近,感知到的数据通常是相同的,所以这些联节点中,只有一个节点的数据是需要的,其他节点可以进入睡眠状态来保存能量。这样,就可以延长网络寿命。

1.2 主副簇头的选取

1.2.1 备用簇头节点的选取

在网络部署阶段,基站以一个特定的发射功率向 A 区域发送广播包,包中保存一个计数标号 counter。A 区域内的每个无线传感器节点接收到基站发送的广播包后,在包中添加自己的节点号和剩余能量值,保存 counter 值,并将广播包中的 counter 值加 1,然后以相同大小的发射功率继续广播。

每个传感器节点都保存一张存有邻节点号及对应的邻节点距离和剩余能量值的邻节点表,如表 1 所示。

表 1 邻节点表

| 节点号 | 邻节点距离 | 剩余能量 |
|-----------|-------|------|
| ... | ... | ... |
| 总邻节点数:... | | |

为了实现簇头节点数的合理性,本文采用与文献[3]中提出的 CDAT 协议相同的簇头数计算方法。簇头选择机制采用分布式的算法,单个节点根据概率独立地选择是否成为簇头。节点 i 成为簇头的概率由式(1)计算。

$$Th(i)_{\text{imp}} = \mu \times \frac{nb-1}{nb} \times \frac{k}{N} \times \frac{E_{i\text{-current}}}{E_{\text{origin}}} \times \frac{\text{evdist}}{r} \quad (1)$$

其中: k 由式(1)确定; nb 表示节点 i 的总邻节点数;evdist 表示节点与邻节点的平均距离,它的值为邻节点距离之和除以总邻节点数; r 表示节点的感知半径; μ 为备选簇头数调节因子; N 为系统总节点数; $E_{i\text{-current}}$ 表示节点当前的能量; E_{origin} 表示节点初始的能量。

本文采用文献[7]中提出的无线能量消耗模型。节点发送数据的能量消耗模型如式(2)所示。

$$E_{Tx}(L, d) = \begin{cases} L \times E_{\text{elec}} + L \times \epsilon_{\text{mp}} \times d^4 & \text{if } d > d_0 \\ L \times E_{\text{elec}} + L \times \epsilon_{\text{fs}} \times d^2 & \text{if } d \leq d_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中: E_{elec} 表示无线收发电路能耗, ϵ_{mp} 和 ϵ_{fs} 分别表示自由空间模型和多路衰减模型的放大器能耗, d_0 是常数, L 为要发送或接收的数据位数。

对于任意节点 i ,在备用簇头选取阶段需要执行备用簇头生成算法,计算阈值 $Th(i)_{\text{imp}}$,然后产生一个 $0 \sim 1$ 的随机数 p ,这个随机数与阈值 $Th(i)_{\text{imp}}$ 相比较,如果随机数小于阈值,则节点当选为备用簇头。

1.2.2 延迟策略选择主簇头

选出备用簇头后,采用文献[2]提出的智能延迟策略的簇头选择机制。所有备用簇头节点根据自己当前的剩余能量和节点号计算发送簇头通告的延时竞争簇头,用 $T(i) = \delta \times \frac{nb-1}{nb} \times \frac{1}{E_{i\text{-current}}}$ 来确定发送延时, δ 是一个时间常数, nb 为节点 i 的邻节点数。接着进入簇头选举阶段,所有节点同时启动选举计时器 $T(i)$ 和终止计时器 $T_{\text{end}}(i)$ 。选举计时器 $T(i)$ 用于确定簇头通告的发送延时,而终止计时器 $T_{\text{end}}(i)$ 用于将整个组簇过程限制在一定的时间之内,避免可能发生的死锁状态,一旦 $T_{\text{end}}(i)$ 超时,所有的节点无论其 $T(i)$ 是否仍然处于等待的状态,都会退出簇头的选举过程。当延时到期,对应的备用节点将记录的参数 isch_置为 1,表示当选为主簇头,并向邻节点发送成为主簇头的通告,属于主簇头邻节点的备用簇头将 isch_置 0,退出簇头选举,并加入该簇。收到一个簇头通告的节点成为该簇头的成员节点,收到两个或以上的簇头通告的节点根据收到通告信号的强度大小选择加入簇。在备用簇头的延迟通告结束后,没有收到任何簇头通告的节点再次启动延迟策略计算 $T(i)$,并以 $T(i)$ 为延时发送成为簇头通告,过程与备用簇头的通告过程一致。

1.2.3 副簇头节点的选取

副簇头分为两种:a) 协助主簇头接收部分簇内信号、聚合部分数据,称为簇内副簇头;b) 转发簇间路由,称为簇间副簇头。

$$\text{主簇头节点计算所需簇内副簇头数 } n_{\text{in-vice}} = \frac{n_{\text{all}} - 2}{n_{\text{ex}}} + 1, n_{\text{all}}$$

表示簇内总节点数, n_{ex} 表示期望的一个簇内副簇头对应的普通节点数。并计算簇内节点对应阈值 $k_0(i) = E_{i-current} \times \frac{dist_i}{evdist_{cluster}}$, $dist_i$ 表示簇内节点离主簇头的距离, $evdist_{cluster}$ 表示簇内节点到主簇头的平均距离。选取阈值 $k_0(i)$ 较大的 $n_{in-vice}$ 个节点作为副簇头,并在 counter 较小者中选择距离主簇头最近的副簇头为簇间副簇头,其他成为簇内副簇头。

主簇头向簇内发送副簇头通告,所有簇内节点知道副簇头节点号后,簇内普通节点根据邻节点中最近的簇内副簇头或主簇头加入,表示之后的数据将发给该簇内副簇头或者主簇头。簇内副簇头将普通节点和自己的节点号发给主簇头,主簇头创建 TDMA 时隙,并发送给簇内副簇头。簇内副簇头和它对应的普通节点进入睡眠状态,等到分配给它的时隙到来时醒来,并侦听普通节点的数据,然后对数据进行聚合后发送给主簇头,完成后又进入睡眠状态,等待下一个时隙的到来。主簇头接收簇内副簇头发过来的数据,再次聚合后发送给簇间副簇头。其中,主簇头发送 TDMA 数据包后,立刻进入睡眠,副簇头接收数据后进行延时发送,直到所有副簇头都收集完数据后,主簇头醒来,接收不属于副簇头的普通节点数据,然后依次接收副簇头的数据。

1.3 簇间路由阶段

在主簇头第二次广播阶段,簇间副簇头根据收到的其他簇的簇间副簇头信息,将在自己的邻节点表中其他簇的簇间副簇头对应的邻节点标记为候选下一跳节点。簇间副簇头收到主簇头发送的数据后,在这些被标记的节点中选取 counter 较小者作为下一跳,如果选取到的节点有多个,则计算 $p(i) = \frac{E_{i-current} \times dist_i}{\sum_k E_{k-current} \times dist_k}$,按概率选择下一跳节点。簇间副簇头每传送一次数据,它的邻节点就更新对应的能量信息。

1.4 簇的维护阶段

1.4.1 误差发送机制进一步减少冗余数据

在无线传感器网络中,节点的感知数据往往在时间上变化很小。为了减少数据冗余,所有节点(包括普通节点、副簇头节点、主簇头节点)在第二次以后的数据发送前,比较前一次发送的数据的误差,在误差满足数据精度要求的前提下,不再向下一跳发送实际数据,而是发送一个表示使用前一次数据的很小的提示数据包。

1.4.2 延长稳定的簇通信阶段

由于主簇头只承担两次广播和与副簇头交互的任务,将簇内普通节点的交互和簇间路由由任务交给副簇头,所以与其他 LEACH 改进算法相比,耗能很少,可以长期承担担任主簇头的任务。

为了降低能耗,延长网络生命周期,利用主簇头能耗低的优点,增加生成簇以后的稳定的通信时间。在完成稳定的簇通信后,不直接进入第二轮的簇建立,而是重新进行副簇头的选取,直到主簇头节点剩余能量低于门限值 E_{min} 后,才进行第二轮的大规模簇生成。

2 协议流程描述

EHMVA 算法中,WSN 拓扑结构主要经过两个过程,即主

簇头的选举和簇内、簇间副簇头的产生。主簇头的选举主要通过分布式算法与延迟策略实现,副簇头的选举策略主要考虑剩余能量与节点距离。主、副簇头选举流程如图 2 所示。

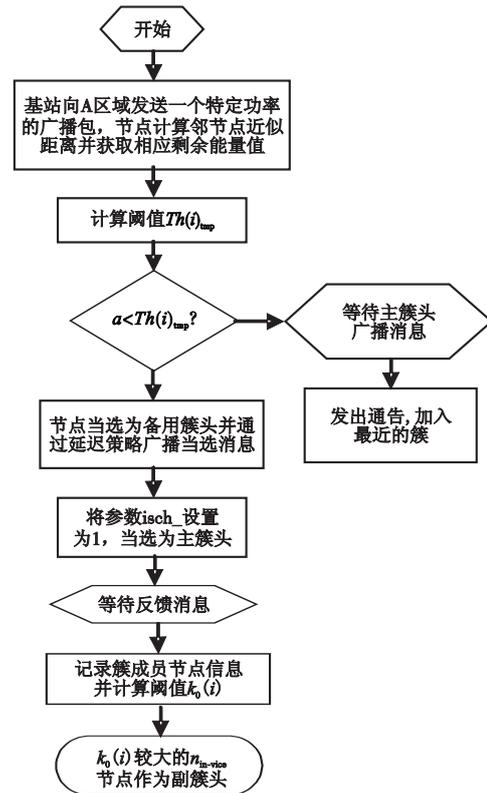


图2 簇头的选举过程

在簇间路由和维护阶段,主簇头和簇间副簇头共同组成簇间路由节点,利用误差发送机制,进一步减少冗余数据,并在簇通信阶段延长通信,减少大规模重建簇带来的能耗。簇间路由和维护阶段流程如图 3 所示。

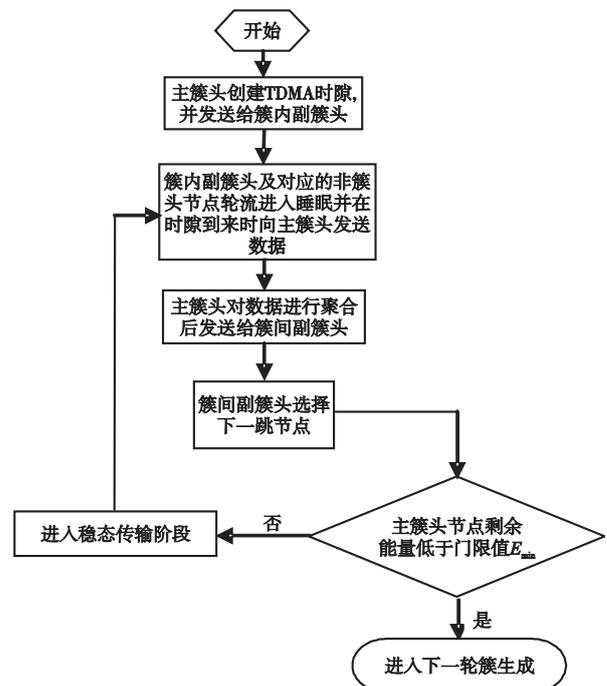


图3 簇间路由及维护过程

3 仿真评估与算法分析

利用 MATLAB 作为仿真平台,采用仿真分析的方法对

LEACH 和 EHMVA 进行了仿真对比。主要通过比较生存节点数、剩余总能量值和第一个、一半和所有节点的死亡时间来证明本文提出算法的优越性。

3.1 仿真场景参数设置

仿真环境参数设置如表 2 所示。1 个 sink 节点和 100 个传感器节点随机分布在 100 m × 100 m 的区域内, sink 节点的坐标为 (50, 175)。当节点能量小于 E_{th} 时, 认为该节点能量耗尽。

表 2 实验采用的参数值

| 参数 | 取值 | 参数 | 取值 |
|----------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 网络大小 | 100 m × 100 m | 长距离传输功耗 ε_{mp} | 0.0013 pJ/bit/m ⁴ |
| 节点数量 | 100 | 数据融合消耗 E_{da} | 5 nJ/bit/signal |
| 汇聚节点坐标 | (50, 175) | 数据包 | 800 bit |
| 簇半径 | 75 m | 失效能量 E_{th} | 0.001 J |
| 发送消耗 E_{elec} | 50 nJ/bit | 广播包 | 100 bit |
| 短距离传输功耗 ε_{fs} | 10 pJ/bit/m ² | 初始能量 | 0.5 J |

3.2 仿真结果分析

图 4 是 LEACH 和 EHMVA 算法的存活节点数随轮数变化的曲线。表 3 和图 5 是分别当第一个、一半和所有节点死亡时对应的轮数。当 LEACH 剩余一半节点时, EHMVA 算法还没有节点死亡; 当 EHMVA 算法刚刚开始有节点死亡时, LEACH 已经只剩余 19 个节点。从图表中可以看出, EHMVA 算法的网络生存时间比 LEACH 延长了约 81%。

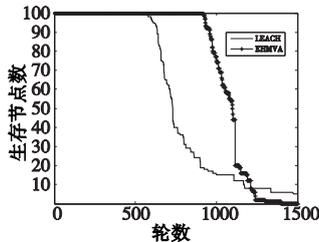


图 4 剩余节点曲线

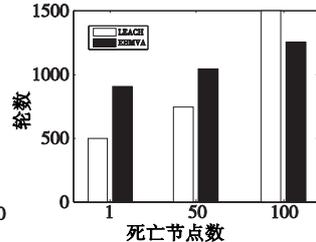


图 5 网络生命周期条形图

表 3 节点死亡时间对照表

| 死亡节点 | 轮数 | |
|-------|-------|-------|
| | LEACH | EHMVA |
| 第一个节点 | 498 | 904 |
| 一半节点 | 743 | 1 043 |
| 所有节点 | 1 500 | 1 251 |

图 6 给出了两种算法的总能量随轮数变化曲线。当 LEACH 在第 634 轮总能量 50 J 消耗了绝大部分时, EHMVA 算法还剩下约 35 J 能量, 比 LEACH 节省了 30%。

虽然 EHMVA 在初始化阶段要完成广播、竞选副簇头等步

骤, 比起 LEACH 协议, EHMVA 的节点初始阶段或多或少还是消耗了一些额外的能量。但是随着运行时间的延长, EHMVA 的优势就越来越明显, 这主要是因为 EHMVA 协议选举了多个副簇头来分担主簇头能耗, 采用多跳方式, 并通过减少冗余数据的传输的方法, 从整体上节省了全网的能量消耗, 而且随着时间的推移, 优势越来越明显。权衡利弊, EHMVA 协议初始阶段所多消耗的能量还是值得的。

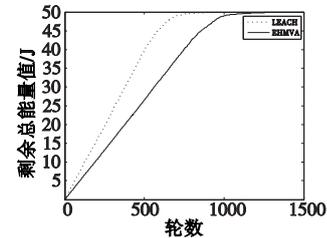


图 6 网络总能量消耗曲线

4 结束语

本文提出了一种能量有效的无线传感器网络多副簇头层次型路由协议 EHMVA, 它采用联结节点发送策略、延迟策略和误差发送机制显著减少了通信量, 并且生成的簇分布也较为均匀; 利用选举多副簇头分担主簇头能耗, 均衡了簇内能耗, 并延长稳定的簇通信时间, 减少了大规模的簇生成所消耗的能量。仿真结果显示, 该协议能够有效改善簇头负载过重的问题, 延长了网络的稳定周期和生存时间。

参考文献:

- [1] HANDY M J, HAASE M, TIMMERMAN D. Low energy adaptive clustering hierarchy with protocol for wireless microsensor networks [C]//Proc of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. [S. l.]: IEEE Computer Society, 2000: 3005-3014.
- [2] 张倩王, 邓成国. 能量有效的无线传感器网络层次型路由协议 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(6): 92-95.
- [3] 杨军, 张德运. 基于分簇的无线传感器网络数据汇聚传送协议 [J]. 软件学报, 2010, 21(5): 1127-1137.
- [4] 陈雪娇, 李向阳. WSN 中 LEACH 协议的研究及改进 [J]. 计算机应用, 2009, 29(12): 3241-3243.
- [5] 沈波, 张世永, 钟亦平. 无线传感器网络分簇路由协议 [J]. 软件学报, 2006, 17(7): 1588-1600.
- [6] 高景菊, 刘玉华. WSN 中基于 LEACH-DCHS 协议的簇维护算法 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(30): 95-97.
- [7] LI Jian, MOHAPATRA P. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problems in sensor networks [J]. Pervasive and Mobile Computing, 2007, 3(3): 233-254.