

多级异构无线传感网高效动态 聚簇策略研究

洪榛¹ 俞立² 张贵军²

摘要 针对多级异构无线传感器网络 (Wireless sensor networks, WSNs) 路由问题, 提出一种高效动态聚簇策略 (Efficient and dynamic clustering scheme, EDCS). EDCS 在给定多级异构网络环境下, 结合考虑理想状态的平均能量预测和历史能耗参考值估计下轮平均网络剩余能量, 决定节点当选簇头的概率, 以此指导整个簇头选举过程. 同时在簇形成过程中引入类万有引力思想, 以引力大小确定非簇头节点加盟哪个簇. 仿真实验结果验证 EDCS 的有效性, 且比 LEACH, SEP, DEEC 和 EDFCM 更适合应用于多级异构无线传感器网络.

关键词 多级异构, 聚簇, 平均能量估计, 类万有引力, 路由, 无线传感器网络

引用格式 洪榛, 俞立, 张贵军. 多级异构无线传感网高效动态聚簇策略研究. 自动化学报, 2013, 39(4): 454–460

DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.00454

Efficient and Dynamic Clustering Scheme for Heterogeneous Multi-level Wireless Sensor Networks

HONG Zhen¹ YU Li² ZHANG Gui-Jun²

Abstract In this paper, an efficient and dynamic clustering scheme (EDCS) is proposed for routing problem in heterogeneous wireless sensor networks. In order to guide the process of cluster head election for a given multi-level heterogeneous network, EDCS determines the probability of node to be a cluster head through average network residual energy estimation in next round by average energy consumption forecast in ideal state and reference value of historical energy consumption simultaneously. Furthermore, analogous universal gravitation is introduced to make non-cluster head node joining cluster in terms of gravitation during cluster formation process. Simulation results have proved efficiency of EDCS. It applies more suitable than LEACH, SEP, DEEC, and EDFCM for multi-level heterogeneous wireless sensor networks (WSNs).

Key words Multi-level heterogeneity, clustering, average energy estimation, analogous universal gravitation, routing, wireless sensor networks (WSNs)

Citation Zhen Hong, Li Yu, Gui-Jun Zhang. Efficient and dynamic clustering scheme for heterogeneous multi-level wireless sensor networks. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(4): 454–460

收稿日期 2011-09-29 录用日期 2012-06-07

Manuscript received September 29, 2011; accepted June 7, 2012

国家自然科学基金 (60974017, 61075062), 浙江省自然科学基金 (Y1100891), 浙江理工大学科研启动基金 (1202815-Y) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (60974017, 61075062), Natural Science Foundation of Zhejiang Province (Y1100891), and Science Foundation of Zhejiang Sci-Tech University (ZSTU) (1202815-Y)

本文责任编辑 关新平

Recommended by Associate Editor GUAN Xin-Ping

1. 浙江理工大学机械与自动控制学院 杭州 310018 2. 浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023

1. School of Mechanical and Automatic Control, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018 2. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023

该文的英文版同时发表在 *Acta Automatica Sinica*, vol. 39, no. 4, pp. 454–460, 2013.

由于受各种资源约束, 通信协议一直以来都是无线传感器网络 (Wireless sensor networks, WSNs) 较为严重的软肋^[1]. WSNs 是以数据为中心的数据驱动型无线网络, 其本身不关心数据的发送方和接收方, 与一般的有线网 (如 Ethernet) 或者无线网络 (如移动 Ad Hoc 网络) 有着本质的区别. 因此, 适用于移动 Ad Hoc 网络的基于 IP 协议路由和传统多跳路由很难直接照搬到 WSNs 中去^[1]. 层次型路由是 WSNs 中比较具有代表性的通信协议, 其分簇思想和数据融合机制弥补了传统平面路由的不足, 保障全网的连通性和负载均衡, 最大化网络生命周期^[2].

在过去的十年里, LEACH (Low-energy adaptive clustering hierarchy) 协议^[3] 一直被认为是 WSNs 分簇算法中最具代表性意义的能量节约型分布式路由协议, 但也存在着不少问题^[4]: 1) 未考虑节点剩余能量; 2) 簇头选取分布不均; 3) 随机选取簇头及成簇方式容易带来大量不确定因素; 4) 容易出现能耗不均的现象. 针对上述问题, 不少学者在 LEACH 的基础上提出改进算法, 如 PEGASIS (Power-efficient gathering in sensor information systems)、TEEN (Threshold sensitive energy efficient sensor network protocol)、HEED (Hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach) 等. 此类协议针对同构 WSNs, 在异构网络中表现不尽如人意^[5].

近些年来, 国内外有关异构 WSNs 的路由协议研究层出不穷. 如刘志等^[6] 提出分环多跳分簇路由算法, 在不同环内构建大小不同的簇, 同时以分环方式实现簇头间的多跳通信, 能基本满足节点能量异构网络. 文献 [7] 提出了异构感知分簇协议 (Stable election protocol, SEP), 它将网络节点分为高级与普通两种类型, 其中高级节点比普通节点装配更多的起始能量, 根据剩余能量及加权选择概率选举每个簇的簇头. SEP 能够在两级异构 WSNs 中获得更长的稳定期生命周期, 但不足以胜任多级异构网络环境. 同样针对两级异构 WSNs, Zhou 等^[8] 考虑所有节点的剩余能量和能耗速率, 提出可靠的传输协议 (Energy dissipation forecast and clustering management, EDFCM), 该协议在给出能耗数学模型的基础上以一阶能量消耗预测作为簇头选举依据, 但这一过程必须要知道下一轮的近似平均能耗, 而预测全网可能的生存时间和下轮平均能耗存在一定的难度, 往往容易造成结果的偏差. Qing 等^[5] 以节点剩余能量和全网平均剩余能量之比作为簇头选举条件, 提出了一种适用于两级异构 WSNs 并可进一步推广到多级异构网络的分布式能量高效分簇路由协议 (Distributed energy efficient clustering, DEEC). DEEC 也是依靠估计网络总的生命周期来计算全网每轮近似的平均剩余能量, 然而评估全网可能的理想生存时间显然是极其困难的, 不可预测的. 而 Kumar 等^[9] 提出针对三级异构 WSNs (节点被分为超级、高级和普通三种类型) 的能量高效异构聚簇算法 (Energy efficient heterogeneous clustered, EEHC), 同 DEEC 相似, EEHC 同样依赖于节点剩余能量和相似的加权选择概率选举簇头, 无法证明是否适用于多级异构网络. 上述大部分协议都偏向于两级或三级异构网络, 并无进一步证明其是否仍适用于情况更加复杂、更贴合实际的多级异构 WSNs.

本文主要针对异构环境下的多级 WSNs, 假设每个节点在初始状态下装配不同的起始能量, 而且每个节点每轮消耗的能量也是不尽相同的. 区别于同构的 WSNs, 异构多级特征更能接近于实际网络, 符合实际应用需要. 为了延长网络的生命周期, 本文提出一种新的高效动态聚簇策略 (Efficient

and dynamic clustering scheme, EDCS). EDCS 在给定的多级异构 WSNs 环境下, 重点分析了平均网络能量估计, 并基于该能量估计提出新的簇头选举机制, 同时引入类万有引力定律来指导簇形成过程. 最后本文还给出了 EDCS 与其他几类算法的比较结果.

1 异构网络模型

异构 WSNs 包含计算异构、链路异构和能量异构三种类型^[9], 为了满足异构 WSNs 的要求和减少其复杂性, 本文暂且只考虑能量异构类型. 文献 [8–9] 分别给出两级和三级两个异构网络的特例模型, 本文在此基础上给出多级异构网络的数学模型. 假设 N 个全然的传感节点均匀部署在 $M \times M$ 的正方形区域, 非簇头节点不允许直接与基站通信, 只有每个簇的簇头才能与基站直接数据通信. 特别地, 簇头也只能在其通信范围内接收到非簇头节点的信息 (保证同簇才能通信), 并在发送给基站前执行融合策略来减少数据冗余度.

在多级异构 WSNs 中, 每个节点装配区间 $[E_0, E_0(1+\lambda)]$ 的初始能量, 且每个节点保持不同的能量, 其中 E_0 是初始能量的下界, 参数 λ 为常数, $\lambda > 0$, 且决定最大初始能量的设置倍数, 如果 $\lambda = 0$ 即视为同构网络. 令当前网络是由 N 个节点组成的节点集记为 S , 且 $S = \{s_i | s_i = (x_i, y_i), s_i \in \mathbf{R}^2, i = 1, 2, \dots, N\}$. 因此, 节点 s_i 装配的初始能量为 $E_0(1 + \lambda_i)$, 表示该节点装配了能量为 λ_i 倍最低下界 E_0 的能量, 那么该异构 WSNs 的所有节点初始能量和为

$$E_{\text{Total}} = \sum_{i=1}^N E_0(1 + \lambda_i) = E_0 \left(N + \sum_{i=1}^N \lambda_i \right) \quad (1)$$

实际上, 从式 (1) 发现, 整个异构 WSNs 的初始能量可等价于装配了初始能量为 E_0 的 $(N + \sum_{i=1}^N \lambda_i)$ 节点规模的同构网络, 但其聚簇过程却是要复杂许多. 不失一般性, 假设基站位于网络的中心位置 (同文献 [3, 5, 8–9]), 且各节点保持静止或者微移动. 此外, 本文仍然沿用文献 [3] 的能耗模型.

2 EDCS 协议

2.1 平均网络能量估计

能量因素是每个通信协议必须要面对的首要问题, 对于下一轮平均网络能量的估计, 有助于分簇算法中簇头的准确选取. 选举剩余能量较多的节点成为簇头, 能够使得全网的能耗达到均衡, 从而提升有限资源环境下网络的生命周期. 给定一理想状态, 节点都是均匀分布的, 且由于负载均衡最后所有节点都在同一时间死亡. 令 $\bar{E}_{\text{ideal}}(r)$ 为这一理想状态下第 r 轮网络平均剩余能量, 则有:

$$\bar{E}_{\text{ideal}}(r) = \frac{1}{N} E_{\text{Total}} \left(1 - \frac{r}{R} \right) \quad (2)$$

其中, R 为网络总的生存时间. 如果网络的平均剩余能量满足或者接近式 (2), 那么就能最大限度地保证所有节点能在同一时刻死亡, 从而在某种程度上提高网络的生存时间.

为计算理想状态下第 r 轮网络平均剩余能量 $\bar{E}_{\text{ideal}}(r)$, 参数 R 作为网络总的生存时间也是十分重要的. 通常预测网络生命周期极其困难, 在前述理想状态下, R 可近似地表示为

$$R = \frac{E_{\text{Total}}}{E_{\text{round}}} \quad (3)$$

这里, E_{round} 是每轮所有节点消耗的能量之和. 根据能耗模型, 则有

$$E_{CH} = \left(\frac{N}{k} - 1\right) lE_{\text{elec}} + \frac{N}{k} lE_{DA} + lE_{\text{elec}} + l\xi_{fs} d_{\text{toBS}}^2 \quad (4)$$

$$E_{\text{nonCH}} = lE_{\text{elec}} + l\xi_{fs} d_{\text{toCH}}^2 \quad (5)$$

E_{CH} , E_{nonCH} 分别对应簇头节点和非簇头节点每轮发送 l 位消息包消耗的能量, 其中 E_{elec} 为节点发射每位 (bit) 数据消耗的能量, 参数 ξ_{fs} 为传输放大参数; k 为该轮网络中簇的数量, E_{DA} 为处理融合每位数据消耗的能量, d_{toBS} 为簇头节点与基站的平均距离, d_{toCH} 则为非簇头节点与簇头的平均距离. 在假设 N 个节点均匀分布于 $M \times M$ 区域的条件下, d_{toBS} 和 d_{toCH} 分别表示为^[3,10]

$$d_{\text{toBS}} = \int_{M^2} \sqrt{x^2 + y^2} \frac{1}{M^2} dM^2 = 0.3825M \quad (6)$$

$$d_{\text{toCH}} = \sqrt{\int \int (x^2 + y^2) \rho(x, y) dx dy} = \frac{M}{\sqrt{2\pi k}} \quad (7)$$

由此, 可以计算得出每个簇每轮消耗的能量, 进而获得全网 k 个簇每轮消耗的总能量:

$$E_{\text{round}} = k \cdot E_{\text{cluster}} = E_{CH} + \left(\frac{N}{k} - 1\right) E_{\text{nonCH}} \approx l(2NE_{\text{elec}} + NE_{DA} + k\xi_{mp} d_{\text{toBS}}^4 + N\xi_{fs} d_{\text{toCH}}^2) \quad (8)$$

将式 (1)、(6)~(8) 代入式 (3) 即可求得理想状态下的网络生存周期, 从而计算得到式 (2) 的第 r 轮理想平均剩余能量. 此外, 令 k_{opt} 为最优簇头数量, p_{opt} 为最优的簇头占有比, 则有:

$$k_{\text{opt}} = N \cdot p_{\text{opt}} \quad (9)$$

获取网络每轮运行分簇的最优簇数 k_{opt} 是 NP 难问题^[3], 通过式 (9) 便可以最小代价计算获得 k_{opt} , 从而作为 k 代入式 (8) 进一步计算. 而最优簇头占有比 p_{opt} 通常可根据一定的先验知识预先设定.

事实上, 上述情况下所得的网络平均剩余能量是理想前提下得到的估计值, 且网络生命周期 R 也是在此理想条件下估算得到, 其最终结果并不可靠, 并不能适应于真实环境下的异构 WSNs. 因此, 考虑结合上一轮消耗的平均剩余能量和上一轮分簇后整个网络消耗的能量, 能够更加准确地预测下一轮网络的平均剩余能量.

$$\bar{E}(r) = \alpha \bar{E}_{\text{ideal}}(r) + (1 - \alpha) \times \left(\bar{E}(r-1) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i(r-1) \right) \quad (10)$$

式 (10) 给出了预测第 r 轮的网络平均剩余能量 $\bar{E}(r)$, 其中, $\bar{E}(r-1)$ 为第 $r-1$ 轮 (上一轮) 全网的平均剩余能量, $E_i(r-1)$ 为节点 s_i 在第 $r-1$ 轮消耗的能量, 而 $\sum_{i=1}^N E_i(r-1)$ 则为上一轮全网各节点消耗的能量之和, 这里每个节点 s_i 并不需要获知其他节点剩余能量值, 在每轮通信结束前, 每个节点都会将自身的剩余能量嵌入消息包并发送出去, 最终不受能量约束的 Sink 节点计算结果, 并将该结

果以消息包的形式逐级传输给网内各个节点; α 为加权系数, 且 $\alpha \in (0, 1)$, α 越小则表示历史能量消耗参考值在预测本轮的平均剩余能量中占据的比重越大, 反之则是理想状态估计值所占比例大. 式 (10) 给出的最终预测结果减小了原先理想状态下的估计误差, 使得估计得出的第 r 轮网络平均剩余能量更接近当前网络的实际值.

2.2 簇头选举机制

平均网络能量估计对簇头选取起到指导性作用. 显然, 除优先选取较高剩余能量的节点作为簇头外, 也要考虑全网能耗的平衡, 如果能保证所有节点均能几乎在同一时间段内死亡, 网络生存时间必然增长, 那么簇头选举还是相对成功的. 令 τ_i 为节点 s_i 当选簇头的轮转周期, 已知 p_{opt} 为最优簇头占有比, 在同构 WSNs 或理想态异构 WSNs 中, 能够确保网络每轮都会形成 $N \cdot p_{\text{opt}}$ 簇头 (即式 (9) 成立), 而节点 s_i 每隔 $\tau_i = 1/p_{\text{opt}}$ 轮当选一次簇头, 且有 $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_{N-1} = \tau_N$. 遗憾的是, 在实际多级异构 WSNs 环境下, 各节点拥有不同的初始能量, 如果仍然按照同构环境下的机制, 必然会导致低能量的节点提前耗尽自身能量死亡, 从而就会影响到整个网络的正常工作和生存时间. 因此, EDCS 中每个节点 s_i 当选簇头的轮转周期 τ_i 必不相同, 且依赖于该节点当前的剩余能量.

令 P_i 为节点 s_i 在第 τ_i 轮转周期内当选簇头的平均概率, $P_i = 1/\tau_i$. 在同构环境下, P_i 可以等价地被看成 p_{opt} , 而异构环境下, 由于节点装配不同的初始能量, 带有较高能量的节点满足 $P_i > p_{\text{opt}}$, 反之则有可能 $P_i < p_{\text{opt}}$. 将能量因素引入到簇头选举过程中, 则节点 s_i 当选的平均概率 P_i 可写为

$$P_i = p_{\text{opt}} \cdot \left[1 - \frac{\bar{E}(r) - E_{\text{res}}^i(r)}{\bar{E}(r)} \right] \quad (11)$$

其中, $E_{\text{res}}^i(r)$ 为节点 s_i 第 r 轮的剩余能量, 因为 $N \cdot \bar{E}(r) = \sum_{i=1}^N E_{\text{res}}^i(r)$, 则式 (11) 可转化为

$$P_i = p_{\text{opt}} \cdot \frac{E_{\text{res}}^i(r)}{\bar{E}(r)} \quad (12)$$

上式给出单个节点当选簇头的平均概率, 那么所有节点当选的权重 (即每个节点当选簇头的平均概率之和) 则可表示为

$$\sum_{i=1}^N P_i = \sum_{i=1}^N p_{\text{opt}} \cdot \frac{E_{\text{res}}^i(r)}{\bar{E}(r)} = p_{\text{opt}} \sum_{i=1}^N \frac{E_{\text{res}}^i(r)}{\bar{E}(r)} = N \cdot p_{\text{opt}} \quad (13)$$

显然, 从式 (13) 可以发现, 所有节点当选的权重刚好为当前最优簇的数量, 这也确保多级异构网络环境下每个周期内簇头数量的稳定. 而根据式 (12), 节点 s_i 的轮转周期 τ_i 也可以表示为

$$\tau_i = \frac{1}{P_i} = \frac{\bar{E}(r)}{p_{\text{opt}} \cdot E_{\text{res}}^i(r)} = \tau_{\text{opt}} \cdot \frac{\bar{E}(r)}{E_{\text{res}}^i(r)} \quad (14)$$

其中, τ_{opt} 是节点成为簇头的最优轮转周期, τ_{opt} 在这里可以等价于 $1/p_{\text{opt}}$. 显然, 从式 (14) 可以看出, 节点 s_i 的剩余能量越多, 则其轮转周期也就越短, 该节点也就越有可能成为簇头, 反之则亦然. 以剩余能量作为主要考虑机制, 可以尽可能缓解由于节点初始化能量不同以及网络运行过程中节点耗

能不同所带来的全网负载不均、生存时间降低的问题, 从而进一步平衡网络各节点的能量消耗, 最终延长网络生命周期. 另一方面, 式 (14) 也从侧面反映了节点 s_i 的轮转周期 τ_i 将围绕着最优轮转周期上下波动.

针对本文提及的多级异构网络模型, 引入簇头选取加权概率, 可以较好地解决异构环境下节点成为簇头概率的不定性. 因此, 多级异构网络环境下的单独节点 s_i 的加权概率为

$$P'(s_i) = p_{\text{opt}} \cdot \frac{E_0(1+\lambda_i)}{\frac{E_0}{N} \left(N + \sum_{i=1}^N \lambda_i \right)} = \frac{Np_{\text{opt}}(1+\lambda_i)}{N + \sum_{i=1}^N \lambda_i} \quad (15)$$

此时, $P'(s_i)$ 可以等价地视为式 (12) 中同构网络环境下的 p_{opt} , 将 $P'(s_i)$ 代入式 (12), 即可得到多级异构网络环境下节点 s_i 当选簇头的平均概率:

$$P'_i = \frac{Np_{\text{opt}}(1+\lambda_i)}{N + \sum_{i=1}^N \lambda_i} \cdot \frac{E_{\text{res}}^i(r)}{\bar{E}(r)} \quad (16)$$

同时得到多级异构网络下节点 s_i 当选簇头的轮转周期 τ'_i 为

$$\tau'_i = \frac{1}{P'_i} = \frac{N + \sum_{i=1}^N \lambda_i}{Np_{\text{opt}}(1+\lambda_i)} \cdot \frac{\bar{E}(r)}{E_{\text{res}}^i(r)} = \tau'_{\text{opt}} \cdot \frac{\bar{E}(r)}{E_{\text{res}}^i(r)} \quad (17)$$

与前述同构网络相似, 剩余能量决定了簇头选举方向, 当 $E_{\text{res}}^i(r) > \bar{E}(r)$, 则 $\tau'_i < \tau'_{\text{opt}}$, 反之亦然. 由于多级异构环境下初始能量装配和运行消耗都不同, 更需要多考虑全网能量的均衡消耗, 而本文提出的 EDCS 使得能量多的节点更易成为簇头节点, 从而尽可能地平衡各节点的能耗.

令 $T(s_i)$ 为节点 s_i 选举成为簇头的概率阈值, 则有:

$$T(s_i) = \begin{cases} \frac{P'_i}{1 - P'_i(r \bmod \frac{1}{P'_i})}, & \text{若 } s_i \in G \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (18)$$

其中, r 是轮数, G 是当前轮转周期内未当选簇头的节点集, 当节点 s_i 的在 τ'_i 轮转周期内并未当选过簇头, 那么该节点就属于 G . 同构网络中 p_{opt} 起到一个关键性的作用, 而在异构网络环境下, 平均概率 P'_i 决定了节点 s_i 的阈值 $T(s_i)$ 大小和簇头轮转周期 τ'_i . 这里, P'_i 将 p_{opt} 作为标准, 始终围绕其做上下波动. 现将式 (16) 代入式 (18) 得到式 (19).

此时, 式 (19) 是最终节点当选概率阈值的计算式. 每一轮节点 s_i 随机产生一个区间为 $(0, 1)$ 的小数 $\text{Rand}(0, 1)$, 并与其阈值 $T(s_i)$ 做比较, 若 $\text{Rand}(0, 1) < T(s_i)$, 则节点 s_i 将成为簇头. 迭代执行上述过程, 便可选举得到本轮 k 个簇头节点集.

2.3 簇形成过程

待簇头选出后, 便向全网广播自己当选的消息, 并等待其他非簇头节点的加盟. 在通信范围内, 非簇头节点接收多

个簇头发送的邀请加入的消息包, 通过判定接收信号的强弱 (Received signal strength indicator, RSSI) 确定发送方和接收方之间的距离 $d(i, j)$. 引入类万有引力定律, 非簇头节点根据下式给出的簇头引力来确定到底加入哪个簇.

$$F(i, j, r) = \frac{E_{\text{res}}^j(r)}{d^2(i, j)} \quad (20)$$

其中, $F(i, j, r)$ 为第 r 轮非簇头节点 i 与簇头节点 j 之间的引力, $E_{\text{res}}^j(r)$ 则为第 r 轮簇头 s_j 的剩余能量.

簇形成过程仍然本着负载均衡的目的出发, 尽量考虑在剩余能量较多的簇头周围聚集较多的非簇头节点, 同时考虑两者之间的距离因素, 因为普通节点离簇头越远, 就意味着它们之间的通信将消耗更多的能量. 从式 (20) 可以看出, 哪个簇头节点的剩余能量 $E_{\text{res}}^j(r)$ 越大, 则当前非簇头节点越有机会加入该簇; 簇头与非簇头节点的距离也同样决定加入哪个簇, 距离越大则引力越小, 那么加入该簇的可能性也就越小, 反之则加入可能性越大. 此外, 尤其是在网络生命中后期, 由于节点能量与节点间距离存在的数量级差别越来越大, 为有效避免极端情况 (某一成员节点遇到同时存在一个能量小距离近的簇头和一个能量大而距离远的簇头而难以抉择) 的出现, 以网络前期能量与距离之比为参照, 在实验过程中采用相对量, 执行归一化操作.

通过式 (20) 的计算, 每个非簇头节点在经过比较引力大小后即确定本轮应该加入哪个簇, 并向该簇的簇头节点发送请求加入消息包. 簇头在接收到非簇头节点的请求加入消息后, 立即为该节点分配 (Time division multiple access, TDMA) 时隙, 并建立 TDMA 时间表后向所有的簇内成员转发. 而簇内成员接收簇头的 TDMA 时间表后, 保存并等待簇头分配的时隙与簇头进行数据通信. 图 1 给出了完整的簇形成过程的流程图.

一旦簇全部形成, EDCS 协议便进入稳定的数据通信阶段, 簇内成员节点将在既定的 TDMA 时隙内把数据包发送给簇头节点. 簇头在接收数据后执行数据融合算法, 同时临时存储并等待转发基站. 在各簇头将积累到一定程度的数据发送给基站后, 本轮的簇头选择、簇形成和数据通信就告一段落. 紧接着新一轮的迭代过程开始, 一直到各节点耗尽所有能量, 网络生命周期才宣告结束.

3 仿真研究

3.1 实验参数及评价指标

为验证 EDCS 协议的有效性, 尤其是评估其在多级异构网络环境下的性能, 本文采用 Matlab 验证平台, 同时在相同网络实验参数设置下, 将其与经典的 LEACH^[3], SEP^[7], DEEC^[5] 和 EDFCM^[8] 协议做仿真比较实验. 如表 1 所示, $N = 100$ 或 200 个无线传感节点随机部署于 $(100 \text{ m} \times 100 \text{ m})$

$$T(s_i) = \begin{cases} \frac{Np_{\text{opt}}(1+\lambda_i)E_{\text{res}}^i(r)}{\left(N + \sum_{i=1}^N \lambda_i \right) \bar{E}(r) - Np_{\text{opt}}(1+\lambda_i)E_{\text{res}}^i(r)} \left[r \bmod \frac{\left(N + \sum_{i=1}^N \lambda_i \right) \bar{E}(r)}{Np_{\text{opt}}(1+\lambda_i)E_{\text{res}}^i(r)} \right], & \text{若 } s_i \in G \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (19)$$

区域,且基站位于感知区域的中心(50,50).为凸显多级异构网络的性质,每个节点将被赋予不同的初始能量,且能量预测加权比重系数为0.5(即理想估计和历史参考各占一半).此外,本文的仿真实验暂且不考虑无线信道的冲撞和干扰,且LEACH,SEP和EDFCM都已经扩展,从而使之可以运用于多级异构WSNs.

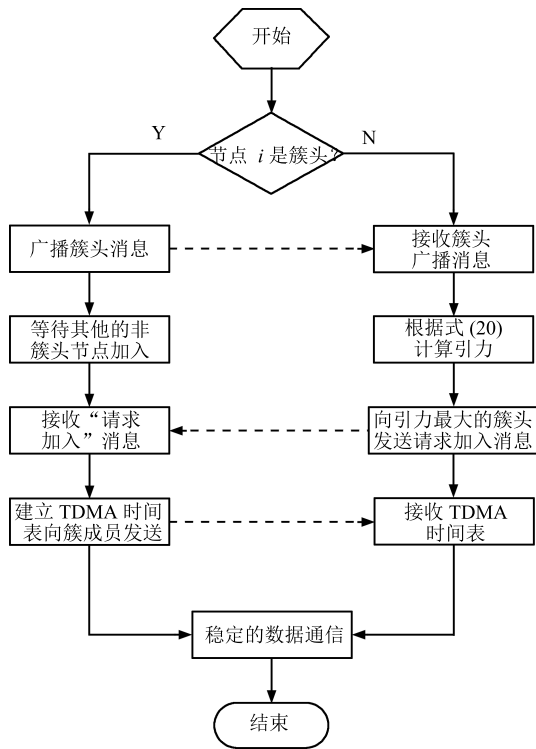


图 1 簇形成流程

Fig. 1 The flow of cluster formation

表 1 网络仿真实验参数设置

Table 1 Network simulation parameters

Parameters	Value
Network size	$(100 \times 100) \text{ m}^2$
Node number	100, 200
Base station (Sink node)	(50, 50)
Initial energy (E_0)	0.5 J
λ	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.5, 4.0
E_{elec}	50 nJ/bit
E_{fusion}	5 nJ/bit
ξ_{fs}	10 pJ/bit/m ²
ξ_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴
$d_{threshold}$	70 m
Data packet size	500 Bytes
Packet header size	25 Bytes
Broadcast packet size	25 Bytes
Request packet size	25 Bytes
Round	5 TDMA
α	0.5

与同构网络相似,网络的生命周期、数据包吞吐量(基站接收到的数据包)将作为检验EDCS性能的重要指标.由于WSNs网络自身资源的限制,这就要求最终形成实际的通信网络能在该有限资源环境下尽可能地延长生存时间.另外,根据表1给出的网络实验参数设置,不仅验证EDCS与LEACH,SEP,DEEC,EDFCM在不同网络节点密度下的性能,而且还衡量其在多级能量配置下的对比结果.

3.2 实验结果及性能分析

为保证实验结果的客观有效,消除随机不确定因素,本文均取多次仿真实验的平均结果.图2给出了 $N=100$ 个节点网络的生命周期,其中 $\lambda=4.0$,每个节点随机装配 $[E_0, 5E_0]$ 的初始能量,形成多级能量异构网络.从图2可以看出,LEACH协议本身就是为同构网络服务,只在同构环境下才能发挥较大的通信效率,而在该异构网络中并不能有效节约能量消耗,延长网络的生存时间.SEP协议较LEACH协议拥有更长的通信稳定期(网络开始运行至第一个节点死亡这段时间),但在通信后期(不稳定期)甚至还不如LEACH.这是由于SEP协议的提出虽然基于异构网络,但其只局限于两级异构网络,在给定的多级异构网络中效果却并不理想.DEEC适用于两级异构网络并可直接扩展至多级异构网络,但过于理想化的平均能量供给阻碍了簇头选举过程,从而影响到整个网络的生存时间.与SEP相似,EDFCM在两级异构网络中表现优异但强制扩展至多级异构环境却仍有所局限.

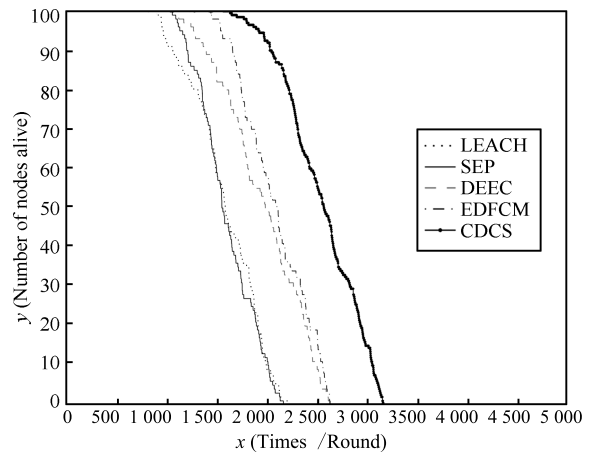


图 2 网络的生命周期 ($N=100$)

Fig. 2 Lifetime of network ($N=100$)

相比较LEACH,SEP,DEEC和EDFCM而言,本文提出的EDCS较适合于多级异构环境,其生命周期也较上述四类协议有所增长.EDCS在第一个节点死亡时间上分别较LEACH,SEP,DEEC和EDFCM协议延长79.5%,55.4%,48.6%和13.6%;而整个网络时间则较LEACH,SEP,DEEC和EDFCM协议分别增长42.4%,46.3%,20.2%和20.4%.之所以执行EDCS协议的生命周期要长于其他四类协议,是因为其拥有更加准确的平均能量评估机制,将理想状态下的能量预测与实际历史能耗参考值结合考虑,更加准确地估计网络下一轮的能量消耗,进而指导簇头的选取;同时配合类万有引力思想,能够构建较为理想的簇,这对于节点的能量消耗乃至全网能耗的负载均衡都提供了较强保障.

现在再来观察能量异构因子 λ 对于EDCS的影响,如

图 3 和图 4 所示, 参数 λ 分别对应于 0.5~4.0 设置环境下的第一个节点死亡和全部节点死亡时间. 从图中可以发现, 随着能量参数设置提高, 即节点装配更多的初始能量, 有助于延长整个网络的生命周期. 在此情形下, 几类协议包括 EDCS 都是随着参数 λ 的增加而使得网络生存时间呈递增趋势. 而图 3 和图 4 也从侧面反映了不管能量参数 λ 如何变化, EDCS 协议的生存周期都要长于其他四类协议.

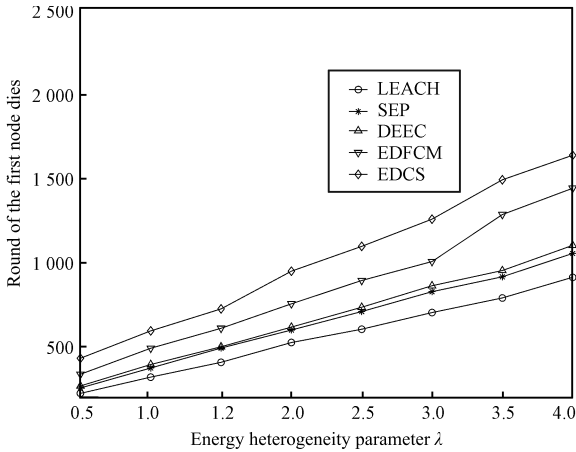


图 3 不同能量异构参数 λ 下第一个节点死亡时间 ($N = 100$)
Fig. 3 The first node dead with different λ ($N = 100$)

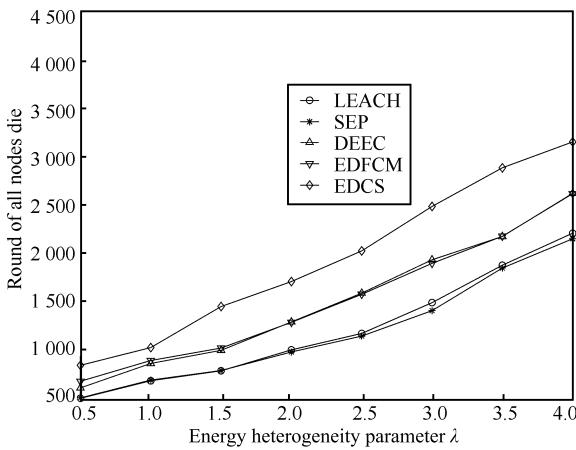


图 4 不同能量异构参数 λ 下全部节点死亡时间 ($N = 100$)
Fig. 4 All nodes dead with different λ ($N = 100$)

另外, 图 5 和图 6 给出了 200 个节点网络密度环境下五类协议的网络生存时间对比. 显然, 随着能量参数 λ 的增加, 五类协议不管是第一个节点死亡时间或是全部节点死亡时间都呈递增趋势, 而 EDCS 依旧凌驾于其他四类协议之上. 同时, 图 5 和图 6 给出的曲线走势结果与图 3 和图 4 相似, 这也从一定程度上反映 EDCS 在不同网络节点密度环境下仍然是极其高效的. 此外, 相比 100 个网络节点密度而言, 200 个节点网络的生命周期较前者所有增长, 但增加幅度不是很明显. 这是由于节点部署的增加虽然可以变相地看成增加了网络的能量总和, 但却同时也给簇头和整个网络的通信带来了负担, 如簇头节点在接收非簇头节点的数据包后, 执行融合算法也需要消耗更多的额外能量.

最后关注各类协议的数据包吞吐量情况. 图 7 和图 8 分别给出各协议在不同网络节点密度下基站接收的来自簇头节

点的数据包统计. 从中可以发现, 在相同能量异构 (λ 相同) 和网络节点密度环境下, 采用 EDCS 协议后基站接收的数据包最多. 这是由于在相同条件下, EDCS 协议执行后网络的负载均衡较为出色, 拥有更多的生存时间使得基站能够接收到簇头更多的数据包. 同样是由于生命周期的延长, 随着能量参数 λ 的增加, 基站接收到的数据包也随之增长. 另外, 图 7 和图 8 还表明网络节点密度的改变不太影响基站接收数据包的多少, 节点密度越大最后基站接收到的数据包较以往稍微有所增长, 但却不是成倍增长. 因为在网络密度较大的条件下, 相同或者邻近检测区域同时存在多个节点采集信息, 冗余度相对较高, 簇头节点将会执行压缩或者融合算法, 因此最终到达基站的数据包不会井喷式地增加, 这也是层次型路由的优势所在. 从另一层面上看, 在有限区域内 (已设定的部署区域), 簇头不会随着节点的增加而成倍增长.

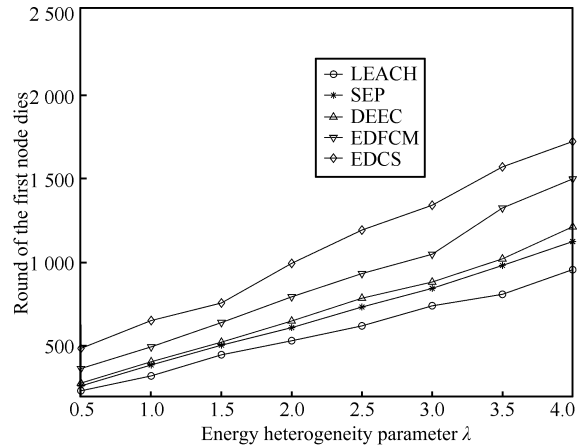


图 5 不同能量异构参数 λ 下第一个节点死亡时间 ($N = 200$)
Fig. 5 The first node dead with different λ ($N = 200$)

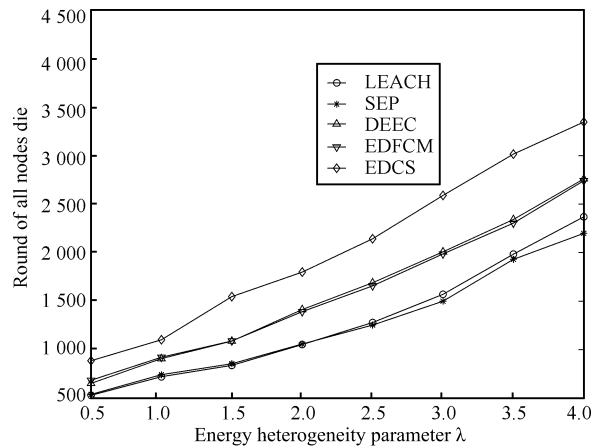


图 6 不同能量异构参数 λ 下全部节点死亡时间 ($N = 200$)
Fig. 6 All nodes dead with different λ ($N = 200$)

4 结论

为解决一般同构网络环境下的路由协议无法直接应用在多级异构网络的弊端, 本文针对多级异构 WSNs 提出高效动态聚簇策略 (EDCS). EDCS 关注节点的能量异构, 通过理想状态下的平均能量预测及历史能耗参考估计下轮平均剩余能量, 以此来决定当前节点成为簇头的概率, 从而较为准确

地指导整个簇头选取过程。同时在簇形成过程中引入类万有引力思想,以引力大小确定非簇头节点加盟哪个簇。仿真实验结果也表明 EDCS 较适用于多级异构 WSN,比 LEACH, SEP, DEEC 和 EDFCM 更加高效,这也为实际网络应用打下了良好的基础。

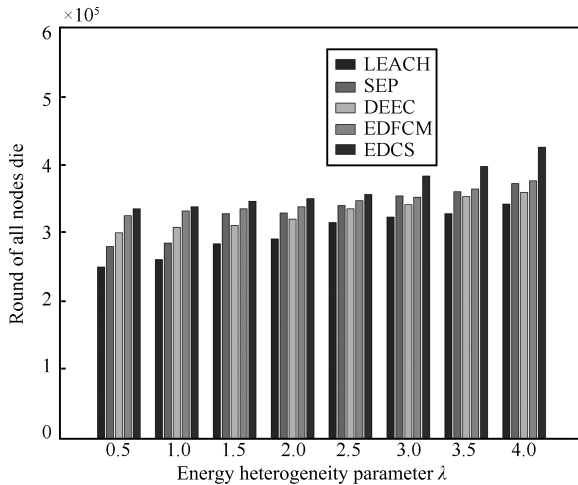


图 7 基站接收的数据包 ($N = 100$)

Fig. 7 Packets received in BS ($N = 100$)

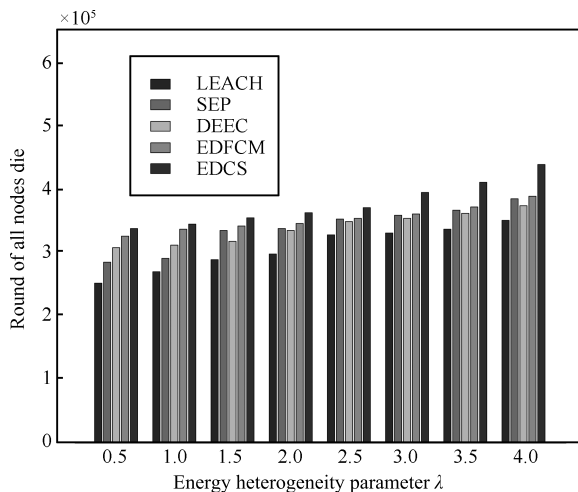


图 8 基站接收的数据包 ($N = 200$)

Fig. 8 Packets received in BS ($N = 200$)

References

- 1 Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 2008, **52**(12): 2292–2330
- 2 Abbasi A A, Younis M. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2007, **30**(14–15): 2826–2841
- 3 Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless mi-

cro-sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, **1**(4): 660–670

- 4 Hong Zhen, Yu Li, Zhang Gui-Jun. An adaptive distributed clustering routing protocol for wireless sensor networks. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(10): 1197–1205
(洪榛, 俞立, 张贵军. 无线传感器网络自适应分布式聚簇路由协议. *自动化学报*, 2011, **37**(10): 1197–1205)
- 5 Qing L, Zhu Q X, Wang M W. Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2006, **29**(12): 2230–2237
- 6 Liu Zhi, Qiu Zheng-Ding. Ring based multi-hop clustering routing algorithm for wireless sensor networks. *Journal on Communications*, 2008, **29**(3): 104–113
(刘志, 裘正定. 基于分环多跳的无线传感网分簇路由算法. *通信学报*, 2008, **29**(3): 104–113)
- 7 Smaragdakis G, Matta I, Bestavros A. SEP: a stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 2nd International Workshops on Sensor and Actor Network Protocols and Applications*. Boston, USA: IEEE, 2004. 223–233
- 8 Zhou H B, Wu Y M, Hu Y Q, Xie G Z. A novel stable selection and reliable transmission protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2010, **33**(15): 1843–1849
- 9 Kumar D, Aseri T C, Patel R B. EEHC: energy efficient heterogeneous clustered scheme for wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2009, **32**(4): 662–667
- 10 Bandyopadhyay S, Coyle E J. Minimizing communication costs in hierarchically-clustered networks of wireless sensors. *Computer Networks*, 2004, **44**(1): 1–16

洪榛 浙江理工大学机械与自动控制学院讲师。主要研究方向为无线传感器网络, 优化, 智能交通。E-mail: hongzhen614@126.com
(HONG Zhen Lecturer at the School of Mechanical and Automatic Control, Zhejiang Sci-Tech University. His research interest covers wireless sensor networks, optimization, and intelligent transportation.)

俞立 浙江工业大学信息工程学院教授。主要研究方向为鲁棒控制, 时滞系统, 分布式控制, 网络控制系统。本文通信作者。

E-mail: lyu@zjut.edu.cn

(YU Li Professor at the College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. His research interest covers robust control, time-delay systems, decentralized control, and networked control systems. Corresponding author of this paper.)

张贵军 浙江工业大学信息工程学院教授。主要研究方向为优化调度, 智能交通。E-mail: zgj@zjut.edu.cn

(ZHANG Gui-Jun Professor at the College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. His research interest covers optimization schedule and intelligent transportation.)