

引用格式: 李正阳, 陶洋, 周远林, 等. 基于占空比的分布式能量中性分簇路由协议[J]. 微电子学与计算机, 2020, 37(10): 30-37. [LI Z Y, TAO Y, ZHOU Y L, et al. Distributed energy neutral clustering protocol based on duty cycle[J]. Microelectronics & Computer, 2020, 37(10): 30-37.]

基于占空比的分布式能量中性分簇路由协议

李正阳, 陶 洋, 周远林, 杨 柳

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘 要: 针对太阳辐照下能量收集能力异构的无线传感器网络, 提出一种基于占空比的分布式能量中性分簇路由协议. 在协议中, 节点结合太阳辐照强度的预测值和自身能量转化效率得出能量收获能力, 并通过遵循两个占空比维持能量中性. 首先从网络中选择满足簇头占空比的节点定义为临时簇头集, 以均衡网络能耗, 保证节点能量中性. 其次从临时簇头集中选出一组分布均匀的最佳簇头, 可有效减少能耗, 提升吞吐量. 最后成员节点根据数据传输占空比调节发送数据的频率, 以求得到最佳的能耗效率. 通过仿真分析, 该协议理论上可达到无限长的网络生存期, 相比其他协议在提升网络吞吐量和降低簇失败次数方面有明显的优势.

关键词: 能量获取无线传感器网络; 占空比; 收集能力异构; 能量中性

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2020)10—0030—08

Distributed energy neutral clustering protocol based on duty cycle

LI Zheng-yang, TAO Yang, ZHOU Yuan-lin, YANG Liu

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: For a wireless sensor network with heterogeneous energy collection capabilities under solar irradiation, a distributed energy neutral clustering routing protocol based on duty cycle is proposed. In the protocol, the node combines the predicted value of solar radiation intensity and its own energy conversion efficiency to derive the energy harvesting ability, maintains energy neutrality by following two duty cycles. First, the nodes selected from the network that satisfy the cluster head duty cycle are defined as temporary cluster head sets to balance network energy consumption and ensure node energy neutrality. Secondly, a set of uniformly distributed optimal cluster heads is selected from the temporary cluster heads, which can effectively reduce energy consumption and improve throughput. Finally, the member node adjusts the frequency of sending data according to the data transmission duty cycle in order to obtain the best energy consumption efficiency. Through simulation analysis, this protocol can theoretically reach an infinite network lifetime. Compared with other protocols, it has obvious advantages in improving network throughput and reducing the number of cluster failures.

Key words: energy harvesting wireless sensor network; duty cycle; Collection capacity heterogeneity; energy neutral

1 引言

传统 WSN 中的传感器节点由电池供电, 在电池供电的无线传感器网络设计中, 能耗仍然是关键

挑战^[1]. 以延长网络生存期为目的的分簇路由协议仍是重点研究方向. 能量收集是一种针对网络生存期被引入无线传感器网络的技术. 它为传感器节点配置环境能源收集装置, 节点可以将太阳能、风能等

环境能源转化为电能供自身使用. 该技术可以极大地延长无线传感器网络的寿命并提升网络的吞吐量.

基于分簇的网络组织方式可有效延长网络寿命, LEACH 是一种最常用的节能分簇路由协议. 该协议中簇头创建 TDMA 帧, 为成员节点分配间隙传递信息, 节点轮流竞选簇头. 但是 LEACH 协议并没有考虑能量获取无线传感器网络(Energy Harvesting Wireless Sensor Network, EH-WSN)^[2]中能量获取的因素. 不过 LEACH 协议启发了分簇路由协议的发展, 以 LEACH 为基础应用于 EH-WSN 中的协议也应运而生^[3-5].

当节点将收集的环境能量作为唯一供给时, 为了获得无限长的网络生存期, 节点或网络在一段时间内消耗的能量必须少于其收获的能量, 这种工作状态称为能量中性^{[6][7]}. 本文提出一种基于占空比的分布式能量中性分簇路由协议(Distributed Energy Neutral Clustering Protocol based on Duty Cycle, DENDC), 适用于 EH-WSN. 协议规定每个周期网络消耗的能量都小于网络收获的能量, 以此构建网络中性约束. DENDC 协议设计两个占空比平衡节点能耗, 保证能量中性.

2 系统模型

2.1 网络模型

假设网络区域是边长为 M 的正方形, 内部随机部署 N 个的传感器节点. 本文的目标是在网络区域中选出一组最佳簇头, 并形成集群, 保持网络的能量中性. 成员节点必须能够单跳与簇头节点通信.

2.2 能耗模型

在无线传感器网络中, 数据传输的能耗与两个通信节点的距离成正比. 本文采用文献[8]提出的能耗模型, 节点发送 1 bit 数据需要消耗的能量为:

$$E_{tx}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + \epsilon_{fs}d^2 & d < d_0 \\ lE_{elec} + \epsilon_{amp}d^4 & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, E_{elec} 是发送电路、接收电路发送或者接收 1 bit 数据所消耗的能量; d 是数据传输的距离. ϵ_{fs} 和 ϵ_{amp} 分别是自由空间传播模型和多经衰落传播模型对应的放大特性常数. d_0 是两种信道的距离阈值, 计算公式如下:

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{amp}}} \quad (2)$$

节点接收 l bit 数据需要消耗的能量为:

$$E_{rx}(l) = lE_{elec} + l(\frac{1}{b} - 1)E_{DA} \quad (3)$$

式中, $(1/b - 1)E_{DA}$ 为融合 1 bit 数据消耗的能量; b 为融合系数. 当 $b = 1$ 时, 表示节点没有融合数据.

2.3 能量收集模型

假设所有传感器节点均可获取太阳能供自身使用. 在一天中, 太阳辐照强度随时间变化而变化, 但是在半小时内可认为太阳辐照强度保持不变^[9]. 本文采用基于天气条件的移动加权平均算法(Weather-Conditioned Moving Average, WCMA)预测未来给定时间内的平均太阳辐照强度 $\bar{I}_0$. 所有传感器节点都暴露在相同强度的太阳辐照下, 但是每个传感器节点都有不同的能量收获效率 $e_i \in [0, 1]$. 为了创建一个更现实的场景, 设定由物体(例如云、树木)产生的阴影会通过均匀分布的随机不透明因子 $\varphi_i \in (0, 5, 1]$ 降低太阳辐照强度. 因此, 节点 i 能量收获能力 η_i 表示为 $\eta_i = \varphi_i \zeta_i e_i \bar{I}_0$. 其中 ζ_i 表示节点 i 的太阳能电池板尺寸. 在较长时间内, 节点 i 平均能量收获能力为 $\bar{\eta}_i = \varphi_i \zeta_i e_i \bar{I}_0$. 最后, 网络中所有节点的平均能量收获能力为 $\bar{\eta}_{total} = 0.75 \bar{\zeta} \bar{e} \bar{I}_0$, 其中 $\bar{\zeta}$ 表示平均节点太阳能电池板尺寸, $\bar{e}$ 表示平均节点能量收获效率.

3 占空比设计

基于占空比的任务循环可以让节点交替工作和睡眠, 是传感器网络中一种主要的节能方式. 本节主要研究节点的占空比设计, 通过占空比调节节点的工作状态, 保证网络维持能量中性状态.

3.1 簇头占空比设计

与 LEACH 协议每轮随机选择簇头节点的方式不同, 在本文中, 节点竞选簇头遵循簇头占空比(Cluster head Duty Cycle). 网络运行一个周期称为一轮, $DC_{CH}(i)$ 是节点 i 的簇头占空比, 表示该节点在未来 L_T 轮内成为簇头的频率. L_T 定义为可预测节点平均收获能量的最大轮数, L_T 轮称为一个回合, T 为无线传感器网络一轮的时长, 即 $L_T T = 30$ min. 例如, 如果 $DC_{CH}(i) = 3$, 表示节点 i 每三轮当选一次簇头节点. 为了最大程度体现节点能量收集效率, 节点在簇头占空比开始时认为自身的剩余能量为 0, 经过每轮积累能量, 达到簇头占空比时竞选簇头. 如果节点没有当选簇头, 则占空比计数值保持不变, 下一轮可以继续竞争簇头节点. 平均能量收获能力改变后, 节点将重新计算未来 L_T 轮内当选簇头

节点的频率,计算公式如(4)所示:

$$DC_{CH}(i) = \begin{cases} \lceil \frac{E_{CH}^m L_T}{\eta_i T \alpha_{CH} L_T} \rceil & \frac{E_{CH}^m L_T}{\eta_i T \alpha_{CH} L_T} \geq 1 \\ 1 & \frac{E_{CH}^m L_T}{\eta_i T \alpha_{CH} L_T} < 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$$\alpha_{CH} = \frac{E_{CH}^m k}{\eta_{total} TN} \quad (5)$$

式中, E_{CH}^m 是簇头节点一轮消耗的平均能量; α_{CH} 是节点每轮分配给簇头的能量占每轮收集能量的比例, $\alpha_{CH} \in [0, 1]$; k 是网络中簇头节点的数量. k/N 表示网络中簇头节点的比例; $\eta_i T \alpha_{CH}$ 表示成员节点一轮结束时的剩余能量. 集群中, 簇头节点将每轮平分为 L_r 个时隙供成员节点向其传输数据, T_s 为一个时隙的时长, 则 $T = L_r T_s$. 如果每轮 $\eta_i T \alpha_{CH} > E_{CH}^m$, 则该节点的 DC_{CH} 取最小值 1, 表示该节点每轮都有足够的能量争当簇头节点. $\lceil x \rceil$ 表示返回不小于 x 的最小整数. 每个回合开始时, 节点使用簇头占空比计数器来确定其占空比是否到来, 该计数器在一轮结束后自动加 1, 直到计数值 DC 为 DC_{CH} . 此时节点满足簇头占空比, 可以参与竞选簇头. 如果节点满足簇头占空比却并未成为簇头节点时, 簇头占空比计数值 DC 保持不变, 该节点下一轮仍可继续竞选簇头. 节点在担任簇头一轮后将 DC 重置为 1. 如果节点没有足够的能量争当簇头, 则本轮继续成为成员节点, 因此, 节点在给定周期没有成为簇头的可能性为 DC/DC_{CH} .

3.2 网络能量中性约束

对于单个节点, DC_{CH} 轮中节点可以保持能量中性. 在无线传感器网络中, 集群数量对网络的吞吐量和生存期都有不同影响. 设定每个集群只有一个簇头节点, 即集群数量等于簇头节点数量. 假设数据包在传输的过程中没有丢失, 定义数据包到达速率为 ρ (packet/second), 数据包长度用 h 表示, 则 TDMA 帧最大持续时间为 $T_f^{\max} = 1/\rho$, 簇头节点最小数量为 $k_{\min} = \lceil NT_s/T_f^{\max} \rceil$. 另外, 基站可分配的正交信道的数量定义了群集的最大数量 $k_{\max}$. 集群数量超过 $k_{\max}$ 时, 簇头节点向基站发送信息会发生冲突. 因此, 簇头节点最佳的数目 $k_{opt} \in [k_{\min}, k_{\max}]$. 协议需要保持每轮网络能耗 E_{net}^m 小于所有节点一轮收集的总能量 E_{net}^{bar} . 首先需要计算一轮中簇头节点消耗的平均能量, 如公式(6)所示:

$$E_{CH}^m = N_f (E_{tx}^{\text{BS}} + (L_c - 1) E_{rx}^{\text{CH}}) \quad (6)$$

式中, L_c 是集群平均节点数量, 也是一个 TDMA 帧中的时隙数, $L_c = N/k$. N_f 是一个周期中 TDMA 帧的平均数量, $N_f = L_r k/N$. E_{rx}^{CH} 是簇头节点在一个时隙中接收数据消耗的能量, $E_{rx}^{\text{CH}} = E_{rx}(\rho T_s h)$. E_{tx}^{BS} 是簇头节点在一个时隙中发送数据消耗的能量, 表示为:

$$E_{tx}^{\text{BS}} = E_{tx}(\rho \alpha (L_c - 1) T_s h, d_{CH-BS}) \quad (7)$$

式中, d_{CH-BS} 是网络中簇头节点到基站的平均距离. 在 TDMA 帧中, 簇头节点将前 $L_c - 1$ 个时隙分配给成员节点用于向自己发送数据, 最后一个时隙用于其向基站传递信息. 根据文献[1], 网络中节点分布均匀时, $d_{CH-BS} = \sqrt{M^2/2\pi}$, 簇内成员节点到簇头节点的平均距离为 $d_{CM-CH} = \sqrt{M^2/2\pi k}$. 其次需要计算每轮集群中所有成员节点消耗的能量 E_{CMS}^m , 如公式(8)所示:

$$E_{CMS}^m = N_f (L_c - 1) E_{tx}^{\text{CH}} \quad (8)$$

式中, E_{tx}^{CH} 是成员节点一个时隙向簇头节点发送数据消耗的平均能量, $E_{tx}^{\text{CH}} = E_{tx}(\rho T_s h, d_{CM-CH})$. 假设每个成员节点都充分利用分配的时隙传输数据. 公式(9)给出了一个周期的网络能耗:

$$E_{net}^m = k(E_{CH}^m + E_{CMS}^m) \quad (9)$$

$$E_{net}^m \leq E_{net}^{\text{bar}} = L_r T_s \sum_{i=1}^N \eta_i = L_r T_s N \bar{\eta}_{total} \quad (10)$$

公式(10)给出了网络的能量中性约束, 即一个周期内成员节点和簇头节点消耗的能量小于所有节点收获的能量. 本文无线传感器网络不是中央基站模型, 且簇头选取符合分布式特点, 网络中节点的平均能量收集能力可以用 $\bar{\eta}_{total}$ 表示.

3.3 数据传输占空比设计

在 EH-WSN 中, 数据传输遵循基于 TDMA 的“工作/睡眠”策略, 成员节点在未分配的时隙中睡眠补充能量, 这样成员节点都遵循 1: L_c 的数据传输占空比. 但是, 如果预测的采集能量不足以维持节点能量中性, 则节点应选择跳过某些 TDMA 帧分配的时隙来进一步降低占空比. 另外节点数据传输应该基于数据包到达速率 ρ , 避免其分配时隙无数据包发送而导致不必要的能源浪费. 因此, 本节提出基于节点能量收集能力和数据包到达速率的数据传输占空比来定义节点利用 TDMA 帧的比例. 例如 $DC_{CM}(j) = 2$, 表示节点 j 每 2 个 TDMA 帧仅使用一次簇头节点为其分配的时隙. 在每个回合开始后, 节点 j 通过自身簇头传输占空比 $DC_{CH}(j)$ 和平均每轮簇头节点能耗 E_{CH}^m 计算处于普通节点时平均每

轮消耗的能量 E_{CM}^i , 计算公式如下:

$$E_{CM}^i = (\eta_p T_s L_r L_T - E_{CH}^m(L_T - L_{CM}^i)) / L_{CM}^i \quad (11)$$

$$L_{CM}^i = L_T - \frac{L_T}{DC_{CH}(j)} \quad (12)$$

式中, L_{CM}^i 是节点 j 在 L_T 轮中成为成员节点的轮数. 节点的数据传输占空比由两部分得出: 根据节点能量收集能力得出的占空比 $DC_{CM}^e(j)$ 和根据数据包到达速率得出的占空比 $DC_{CM}^d(j)$. 计算公式如(13)和(14)所示:

$$DC_{CM}^e(j) = \begin{cases} \lceil \frac{E_{tx}(\rho Th, d_{j-CH})}{E_{CM}^i} \rceil, \\ 1 < \frac{E_{tx}(\rho Th, d_{j-CH})}{E_{CM}^i} \leq N_f \\ 1, & \frac{E_{tx}(\rho Th, d_{j-CH})}{E_{CM}^i} < 1 \end{cases} \quad (13)$$

$$DC_{CM}^d(j) = \begin{cases} \lfloor \frac{N_f}{\rho T} \rfloor, & 1 \leq \frac{N_f}{\rho T} \leq N_f \\ 1, & \frac{N_f}{\rho T} < 1 \end{cases} \quad (14)$$

在公式(13)和(14)中, d_{j-CH} 表示节点 j 与簇头节点的距离; $\lfloor x \rfloor$ 表示取不大于 x 的最大整数. 因此, 节点 j 的数据传输占空比 $DC_{CM}(j)$ 为:

$$DC_{CM}(j) = \begin{cases} \max(DC_{CM}^e(j), DC_{CM}^d(j)), \\ 1 \leq \max(DC_{CM}^e(j), DC_{CM}^d(j)) \leq N_f \\ 0, \\ \max(DC_{CM}^e(j), DC_{CM}^d(j)) > N_f \end{cases} \quad (15)$$

与簇头占空比设计类似, 在一轮周期中, 当成员节点预期可用于数据传输的能量大于节点在所有分配时隙消耗的能量, 且生成的数据包数大于 N_f 时, 即 $DC_{CM}(j) = 1$, 节点在每个 TDMA 帧分配的时隙都传输数据. 在一轮周期中, 如果预期可用于数据传输的能量小于节点在一个时隙消耗的能量, 或者没有生成数据包, 即 $DC_{CM}(j) = 0$, 则节点不加入任何集群, 在循环中保持沉默. 对于 $1 \leq DC_{CM}(j) \leq N_f$, 该节点根据数据传输占空比计数器追踪占空比, 当某个 TDMA 帧开始时节点计数值满足数据传输占空比, 节点将在该帧分配的时隙向簇头节点发送数据.

4 分簇路由协议设计

根据簇头占空比挑选满足能量中性的节点成为

簇头, 从能源角度可以维持节点长期存活, 但无法保证簇头分布均匀, 最大化吞吐量, 还会产生不必要的能量浪费. 在集群初始化时, 规定满足簇头占空比的节点组成临时簇头集. 本节主要阐述集群拓扑形成, 在临时簇头集中选出一组均匀分布的簇头并形成簇. 拓扑过程分为三个阶段: 簇头权重计算、簇头节点选取、集群构建.

4.1 簇头权重计算

假设临时簇头与邻居节点组成临时集群, 由簇头节点的能量分布和邻居节点分布计算簇头的权重. 因为传感器节点分布均匀, 可以根据簇头节点初始百分比 C_{prob} 计算临时集群半径 r_t , C_{prob} 设置为 5%, r_t 的计算公式为:

$$r_t = \sqrt{\frac{M^2}{\pi N C_{prob}}} \quad (16)$$

半径 r_t 是邻居节点之间的参考距离, 具有较高权重的节点具有更高的优先级吸引成员节点加入集群. 簇头权重计算公式如(17)所示:

$$Weight(i) = \gamma E(i) + \beta D(i) \quad (17)$$

式中, $E(i)$ 是簇头节点 i 的能量分布权重; $D(i)$ 是簇头节点 i 的邻居分布权重. γ, β 是权重系数, 且 $0 \leq \gamma, \beta \leq 1; \gamma + \beta = 1$. 簇头的权重是能量分布和邻居分布的组合. $E(i)$ 考虑集群的能量分布, 是节点成为簇头的预期能量和邻居节点本轮的预期能量的比值, 计算公式如(18)所示:

$$E(i) = \frac{\sum_{j=1}^m \eta_j TDC(j) \alpha_{CH}}{m} \quad (18)$$

在公式(18)中, $DC(j)$ 是节点 j 的簇头占空比计数值; m 表示簇头节点 i 的邻居节点数量. 该公式不仅考虑到本轮节点预期能量, 还考虑到了邻居节点的能量分布, 用以平衡节点间的能耗. $D(i)$ 主要考虑节点中心度(节点位于邻居节点的中心程度)和节点度(邻居节点数目), 计算公式如(19)所示:

$$D(i) = \sum_{j=1}^m \frac{1}{d_{i-j}^2} \quad (19)$$

式中, d_{i-j} 是簇头节点 i 和节点 j 之间的距离. 邻居节点到簇头节点的距离越小, 权重值越高, 这意味着节点 i 在其邻居节点的中心, 因此更适合被选取为簇头节点. 簇头节点的邻居节点数量越多, 权重值越高, 也就是说更适合担任簇头节点, 构建密集的集群.

4.2 簇头节点选取

簇头选取保证簇头节点分布均匀, 就要避免集

群范围内的两个节点都成为簇头. 本文采用改进的 HEED 簇头迭代选取方法, 分为三个阶段:

(1) 初始化: 将临时簇头集中的节点选为 $tentative_CH$, 所有的 $tentative_CH$ 计算自身的权重. $tentative_CH$ 竞争成为簇头节点概率 CH_{prob} 的计算公式如(20) 所示:

$$CH_{prob}(i) = \begin{cases} \max(C_{prob} \times \frac{\bar{\eta}_i TDC(i) \alpha_{CH}}{E_{cap}}, P_{min}), & \bar{\eta}_i TDC(i) \alpha_{CH} < E_{cap} \\ \max(C_{prob}, P_{min}), & \bar{\eta}_i TDC(i) \alpha_{CH} \geq E_{cap} \end{cases} \quad (20)$$

式中, E_{cap} 是节点的电池容量; P_{min} 是限制迭代次数的阈值, 规定节点的 CH_{prob} 值不允许比 P_{min} 低, P_{min} 将迭代次数 N_{iter} 限制为 $O(1)$; $\bar{\eta}_i TDC(i) \alpha_{CH}$ 表示节点 i 预测成为簇头时具有的能量水平. 该网络分簇方法可以处理节点电池异构的情况, 每个传感器节点的电池规格可以不同.

(2) 主要处理阶段: S_{CH} 定义为 $S_{CH} = S_{final_CH}$, 其中 $S_{final_CH} = \{\text{从 } 1 \text{ 迭代到 } n \text{ 所有的 } final_CH\}$, $S_{tentative_CH} = \{\text{从 } 1 \text{ 迭代到 } n \text{ 所有的 } tentative_CH\}$. 本阶段重复执行. 阶段开始时, $tentative_CH$ 向其邻居节点广播更新状态. 在第 n 次迭代中 ($n \leq N_{iter}$), 如果 $tentative_CH$ 的 $CH_{prob} = 1$, 则该节点成为 $final_CH$ 并向其簇范围内的节点广播此消息. 另一方面, 如果 $tentative_CH$ 收到某节点成为 $final_CH$ 的消息, 则无法继续竞选簇头节点, 接下来该节点根据 $final_CH$ 的权重选择加入相应的集群. 最后, 每个 $tentative_CH$ 的概率 $CH_{prob}^{n+1} = CH_{prob}^n \times 1.5$, 并继续重复本阶段的下一个迭代. 因为 $tentative_CH$ 的剩余能量普遍较高, 如果迭代增长过快很可能出现大部分 $tentative_CH$ 同时满足 $CH_{prob} = 1$, 这里将迭代增长率设为 1.5. 当 $CH_{previous} = 1$ 时, 节点完成此阶段的执行, 并允许能量较低的节点加入集群.

(3) 完成阶段: 在此阶段, 每个节点都会对自己的状态做出最终决定. 如果该节点不是 $final_CH$ 并已收到至少一个来自 $final_CH$ 的消息, 则它随后选择簇头权重最高的 $final_CH$ 所在的集群加入. 如果节点在迭代结束后仍未收到任何来自 $final_CH$ 的消息, 则该节点自身将成为 $final_CH$ 并吸引邻居节点加入集群. $tentative_CH$ 的预期能量均满足成为簇头节点的要求, 所以不存在簇头选取过程结束时 $CH_{prob} < 1$ 的情况.

4.3 集群构建

簇头选取完毕后, 簇头节点广播“joincluster”消息邀请普通节点加入自己的集群, 该消息包括簇头节点的 ID 值. 如果普通节点只接收到一个“joincluster”消息, 那么该节点加入发送消息的簇头所在的集群. 如果在拓扑阶段结束前收到多个“joincluster”消息, 那么节点会选择簇头权重最高的集群加入.

普通节点确定要加入的集群后向簇头节点发送“enter”消息, 消息包括簇头节点 ID、该节点 ID、本轮预期能量、该节点与基站的距离和该节点与簇头节点的距离. 这些信息主要用来计算集群的规模, 帮助簇头节点构建和调度集群. 簇头节点接收到“enter”消息后, 会检查消息中的簇头节点 ID 是否为自身 ID. 如果是, 记录节点信息, 如果不是, 舍弃这条消息. 确定集群中的成员节点后, 簇头节点会广播“schedule”信息为每个节点分配数据传输的时隙.

4.4 分簇算法伪代码

本节给出改进 HEED 的分簇算法伪代码, 如表 1 所列:

表 1 分簇算法伪代码

Phase I. Initialization

```
1: for every node in the network
2: compute  $DC_{CH}$  and  $r_i$  according to Eq. 4 and Eq. 16;
3: get the current nodes' DC from counter;
4: obtain the neighbor node set ( $S_{nbr}$ ) through
    $S_{nbr}(i) = \{\text{node } j: d_{i-j} < r_i\}$ 
5: compute Weight and  $CH_{prob}$  according to Eq. 17 and Eq. 20;
6: is_final_CH = FALSE;
```

Phase II. Main Processing

```
Repeat
1: if ( $(S_{CH} \leftarrow \{v; v \text{ is a cluster head}\}) \neq \emptyset$ )
2: if (NodeID = MOST_Weight( $S_{CH}$ ) and  $CH_{prob} = 1$ )
3:  $CH\_msg(\text{NodeID}, final\_CH, \text{Weight})$ ;
4: is_final_CH = TRUE;
5: else if ( $CH_{prob} = 1$ )
6:  $CH\_msg(\text{NodeID}, final\_CH, \text{Weight})$ ;
7: is_final_CH = TRUE;
8: else if ( $DC = DC_{CH}$ )
9:  $CH\_msg(\text{NodeID}, tentative\_CH, \text{Weight})$ ;
10:  $CH_{previous} = CH_{prob}$ ;
11:  $CH_{prob} = \min(CH_{prob} \times 1.5, 1)$ ;
Until  $CH_{previous} = 1$ ;
```

Phase III. Finalize

```
1: if (is_final_CH = FALSE)
```

```
2: if((Sfinal_CH←{v:v is a final cluster head}) ≠∅)
3:   my_cluster_head ←MOST_Weight(Sfinal_CH);
4:   join_cluster(my_cluster_head_ID ,NodeID);
5: else CH_msg(Node_ID,final_CH,Weight);
```

5 仿真设计与结果分析

5.1 仿真参数设置

本节内容设计仿真实验评估协议性能,使用 MATLAB 作为仿真工具.网络拓扑由 100 个均匀分布的节点组成,基站位于 (1.5M,0.5M),网络相关参数参考文献[10],如表 2 所列.能量获取数据采用从 NERL 下载的北卡罗来纳州伊丽莎白州立大学^[11]太阳辐照强度,单位为 (W/m²).每个节点都依照 1.3 节的能量收集模型补充能量.

表 2 仿真参数表

参数	值
M	100 m
N/M ²	1 node/100m ²
ε _{fs}	10 pJ/bit/m ²
ε _{amp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴
E _{DA}	5 nJ/bit/signal
E _{elec}	50 nJ/bit
L _r	1200 timeslots
L _T	15 rounds
T _s	100 ms
ρ	0.25~1.25 packet/s
数据包长度 h	2000 bit
平均能量转化效率	0.22
太阳能板面积	1.54 cm ²
P _{min}	0.01
b	0.2

5.2 结果分析

本节对 EP-LEACH、EA-Clustering、EN-LEACH 和本文协议 DENDC 进行仿真实验.仿真通过平均每轮簇失败次数、平均每轮网络吞吐量和平均每轮节点能耗这三个指标来评估 DENDC 协议的性能.因为以上协议均是由 LEACH 协议发展而来,初始簇头百分比设置为 5%.

5.2.1 平均每轮簇失败次数

假设每一轮簇头节点在传递数据前会根据集群内成员节点数目和与基站的距离估算需要消耗的能量,并查看自己剩余能量,如果簇头节点没有足够的能量传递信息,则数据将被丢弃,并导致簇失败.用平均每轮簇失败次数评估协议分簇的效果.

图 1 表示在 500 轮的数据传输中,四种协议在不同数据包生成速率下的平均每轮簇失败次数.随着数据包生成速率的提升,簇头节点每轮需要处理传递的数据将大幅增加,消耗的能量上升,平均每轮簇失败次数也随之增加.但是 DENDC 协议的簇失败次数明显低于其他三种协议.这是因为 DENDC 协议通过簇头占空比保证了节点维持能量中性状态,当数据包生成速率较高时,成员节点根据能耗通过数据传输占空比降低数据发送频率,簇头节点的均匀分布避免了不必要的能量浪费.

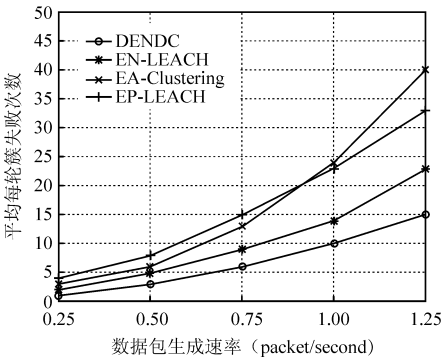


图 1 不同数据包生成速率下平均每轮簇失败次数

EN-LEACH 协议使用网关节点来分担簇头节点的压力,保证了节点能量中性状态,但该协议在集群中选取中继节点的方法不合理,且随着数据包生成速率的增加,选择中继节点的机制将进一步加剧能量的消耗,增加簇失败的次数. EP-LEACH 协议没有建立能量中性约束,在能耗较大的情况下使用势能函数无法准确判断簇头节点能量状态,簇失败次数大幅增加.在数据包生成速率较低的情况下,EA-Clustering 协议使用神经网络预测本轮收获能量有较高的精确度,随着数据包生成速率的提升,节点同时维持数据传输和神经网络导致能耗巨大,当数据包生成速率超过 0.75 packet/s 时,其平均每轮簇失败次数大于其他三种协议.

图 2 表示当数据包生成速率为 0.5 packet/s,监控区域面积从 1×10⁴ m² 向 5×10⁴ m² 逐步增加时,四种协议平均每轮簇失败次数的变化趋势.可以看出,随着监控区域面积的增大,节点通信消耗不断提升,平均每轮簇失败次数也随之增加.当监控区域面积小于 4×10⁴ m² 时,DENDC 的平均每轮簇失败次数明显小于其他三种协议,这得益于 DENDC 协议通过改变占空比来维持节点能量中性状态,有效降低了簇失败次数.当监控区域面积达到 5×10⁴ m² 时,四种协议的簇失败次数相差不多,这是因为以上

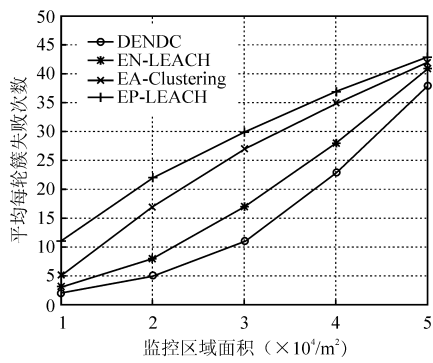


图 2 不同监控区域面积下平均每轮簇失败次数

四种协议都是基于单跳通信方式设计,当簇头节点长距离向基站发送消息需要耗费大量能量. DENDC 协议更适合监控面积小的网络.

5.2.2 节点剩余能量方差

本文除了研究协议如何保证能量中性状态,同时也探求如何可以增加网络吞吐量,提升网络的能耗效率. 图 3 表示在 500 轮的数据传输中,四种协议在不同的数据包生成速率下的平均每轮网络吞吐量对比. DENDC 协议的平均每轮网络吞吐量明显高出其他三种协议,尤其是在数据包生成速率超过 0.75 packet/s 时. 这是因为 DENDC 协议在维持节点能量中性的前提下,成员节点可以根据数据传输占空比灵活调节发送数据的频率. 虽然 DENDC 协议为了维持能量中性状态而降低成员节点发送信息的频率,但其减小了平均每轮簇失败次数,从而保证了较高的网络吞吐量. EA-Clustering 因为数据包生成速率提升后能耗急剧增大导致网络吞吐量增长速率减慢,数据包生成速率超过 0.75 packet/s 后,其吞吐量小于其他三种协议.

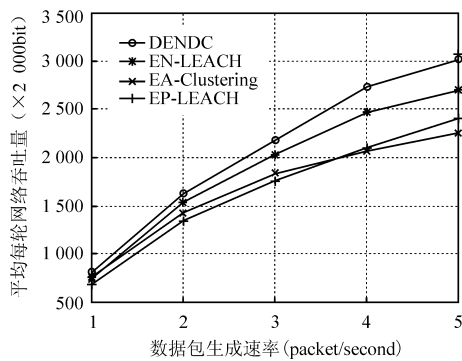


图 3 不同数据包生成率下平均每轮网络吞吐量

5.2.3 平均每轮节点能耗

通过图 4 可以观察在 500 轮的数据传输中,四种协议在不同的数据包生成速率下的平均每轮节点能耗变化. 随着数据包生成速率的提升,四种协议的

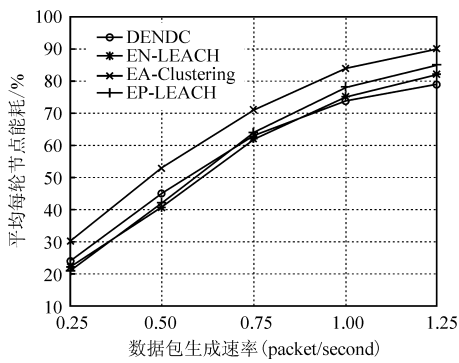


图 4 不同数据包生成率下平均每轮节点能耗

平均每轮节点能耗逐渐增加并趋于 100%. 在数据包生成速率低于 0.75 packet/s 时, DENDC 协议的能耗略高于 EN-LEACH 和 EP-LEACH. 当数据包生成速率高于 0.75 packet/s 时, DENDC 协议通过数据传输占空比降低成员节点的发送数据频率, 能耗略低于 EN-LEACH 和 EP-LEACH. EA-Clustering 协议由于节点维持神经网络预测模型, 其能量消耗明显高于其他协议.

6 结束语

本文基于占空比分析, 提出一种能量收集感知和能量中性约束的分簇路由协议. 协议保证节点根据簇头占空比维持能量中性状态; 通过改进 HEED 簇头选取方法确保簇头节点分布均匀; 并根据数据传输占空比调节成员节点发送数据的频率, 达到能耗效率最优. 仿真结果证明, 本文提出的 DENDC 协议可以长时间保持网络的连通性, 其平均每轮簇失败次数明显少于 EN-LEACH、EA-Clustering 和 EP-LEACH 协议. DENDC 协议的平均每轮网络吞吐量明显大于以上三种协议, 其平均每轮节点能耗与 EN-LEACH 和 EP-LEACH 相差不多, 从而具有更高的能耗效率. 但是该协议基于单跳通信方式设计, 不适用于监控面积较大的 EH-WSN. 未来将考虑研究在节点能量收获能力异构情况下适用于大规模网络的能量中性多跳分簇路由协议.

参考文献:

[1] YANG L, LU Y, ZHONG Y, et al. A multi-hop energy neutral clustering algorithm for maximizing network information gathering in energy harvesting wireless sensor networks[J]. Sensors, 2016, 16(1): 26.
[2] ZHANG Y, GAO H, CHENG S, et al. An Efficient EH-WSN Energy Management Mechanism[J]. Tsinghua Science and Technology, 2018, 23(4):406-418.

- [3] XIAO M, ZHANG X, DONG Y. An effective routing protocol for energy harvesting wireless sensor networks[C]//2013 IEEE wireless communications and networking conference (WCNC). IEEE, 2013: 2080-2084.
- [4] LI J, LIU D. An energy aware distributed clustering routing protocol for energy harvesting wireless sensor networks[C]//2016 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). IEEE, 2016: 1-6.
- [5] MUHAMMAD U B, EZUGWU A E, OFEM P O, et al. Energy neutral protocol based on hierarchical routing techniques for energy harvesting wireless sensor network[C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2017, 1836(1): 020025.
- [6] BAGHAE S, CHAMANIAN S, ULUSAN H, et al. Demonstration of energy-neutral operation on a WSN testbed using vibration energy harvesting[C]//European Wireless 2014; 20th European Wireless Conference. VDE, 2014: 1-6.
- [7] BENGHENI A, DIDI F, BAMBRIK I. EEM-EH-WSN: Enhanced energy management scheme in energy harvesting wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2019, 25(6): 3029-3046.
- [8] YANG L, LU Y Z, ZHONG Y C, et al. An unequal cluster-based routing scheme for multi-level heterogeneous wireless sensor networks[J]. Telecommunication Systems, 2018, 68(1): 11-26.
- [9] HSU J, ZAHEDI S, KANSAL A, et al. Adaptive duty cycling for energy harvesting systems[C]//Proceedings of the 2006 international symposium on Low power electronics and design. ACM, 2006: 180-185.
- [10] MENG J, ZHANG X, DONG Y, et al. Adaptive energy-harvesting aware clustering routing protocol for Wireless Sensor Networks[C]// Communications and Networking in China (CHINACOM), 2012 7th International ICST Conference on. IEEE, 2012: 742-747.
- [11] Andreas, A.; Stoffel, T.; (1985). Elizabeth City State University; Elizabeth City, North Carolina (Data); NREL Report No. DA-5500-56517. <http://dx.doi.org/10.5439/1052558>.

作者简介:

李正阳 男,(1994-),硕士研究生.研究方向为能量获取无线传感器网络,分簇路由协议. E-mail:2280414670@qq.com

陶洋 男,(1964-),博士后,教授,硕士生导师.研究方向为无线传感器网络,异构网络,并行传输,应急通信,网络管理研究及应用等.

周远林 男,(1994-),硕士研究生.研究方向为无线传感网,安全路由协议.

杨柳 男,(1987-),博士.研究方向为物联网、传感网、网络安全以及数据分析.