

距离均衡的自组织无线传感器网络分簇算法*

吴中华

(南通科技职业学院 信息与智能工程学院, 江苏 南通 226007)

摘要:【目的】针对节省能耗、延长网络生命周期的问题,在分析典型分簇算法不足的基础上,提出了能有效减少节点传输能量消耗的距离均衡的自组织分簇算法(DBSOCA)。【方法】在该算法中,簇内节点依据计算自身与基站的距离来竞选簇首,并确保基站与簇首及簇首间的传输能够保持一定的距离。【结果】用平均传输距离来避免簇首因传输距离的不同而造成能耗的不均衡。【结论】仿真结果证明,该算法能有效地降低整个网络的能耗,进而延长网络的生命周期。

关键词:距离均衡;自组织;分簇;无线传感器网络

中图分类号:TP27

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2017)01-0073-05

近些年来在无线传感器网络(WSNs)^[1-3]领域中,出现了不少以节省能耗为目的的分簇算法。低能耗自适应聚类算法 LEACH^[4]是最经典的代表,该算法采用几率的方式来选举簇首(Cluster header, CH),通过随机选择簇首的方式节约建立分簇所需的计算时间,缺点是无法保证选举的簇首是最佳的。低功耗自适应集中分层型 LEACH-C 算法^[5]中,数据处理中心(Sink)根据接收到的节点信息决定簇的构建和簇首的选择,实现最佳分簇,缺点是不适用于 Sink 的位置距离网络较远的情况,分簇时的能耗多。固定簇半径的分簇 HEED 算法^[6]中,是以节点的剩余能源与通信成本为考虑因素的分簇算法,该算法能够保证每次选举的簇首拥有充足的能量,缺点是簇首选举的频率过快,额外的能耗较多。非均匀成簇 EEUC 算法^[7]中,候选节点的剩余能量大于其邻节点时才会竞选成为簇首,在每轮结束后都要重新构造簇,且节点以相同的概率竞选簇首,导致部分节点因多次当选簇首而消耗过多能量。能量高效算法 EDUC^[8]假设簇首距离基站一跳时计算了簇首轮换的能量阈值,但能量驱动的簇首轮换策略并不适合多跳。分簇路由算法 UCS (Unequal clustering size)^[9]提出簇半径的大小与基站的距离成正比,同时在网络中放置一些高能量节点来充当簇首,但 UCS 认为网络中的簇首具有充足的能量,且簇首都是处于簇的中心位置,这显然不适用于实际情形。在分析以上分簇算法的基础上,本研究提出了距离均衡的自组织分簇算法(DBSOCA),通过仿真结果与 LEACH 算法、HEED 算法比较,本算法可以延长各个传感器节点的生命,从而延长 WSNs 的生命周期。

1 算法设计和分析

在 WSNs 运行中,每个簇选举一个簇首^[10],簇内节点将数据发送给簇首,簇首对数据进行融合后发送给 Sink。这种通信方式很大程度上减少了能量消耗,但是簇首的能量消耗是簇内节点的几倍,一旦簇首不能正常工作,簇就无法进行通信,除非选举新的簇首。因此如何快速合理地划分簇、选择簇首是本研究要解决的主要问题。

1.1 网络模型与能量模型

本研究提出的 DBSOCA 适用的 WSNs 具有以下特征:传感器^[11-13]节点随机分布在方形被监测领域内;节点和基站的位置是固定的;节点可以自由切换睡眠与工作模式;节点可动态调整传输能量的大小;基站拥有独立供电的设备;簇内节点与簇首、簇首与 Sink 的通信能耗满足文献[14]中的能量模型;节点拥有独立的标识符;每个节点拥有相同的处理能力及初始能量。使用的一阶无线电模型如图 1 所示。

* 收稿日期:2016-03-11 修回日期:2016-04-08 网络出版时间:2017-01-12 11:34

资助项目:南通市科技创新计划项目(No. MS22015029);南通市科技创新计划项目(No. BK2011054)

第一作者简介:吴中华,男,讲师,研究方向为复杂网络的应用,E-mail:whzsweet@sina.com

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.n.20170112.1134.030.html

假设传感器节点将传输 l -bit 的数据到距离的目的地址, 传输 l -bit 的数据所消耗的能量公式如下:

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx\text{-elec}}(l) + E_{Tx\text{-amp}}(l, d), \quad (1)$$

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} l \times E_{elec} + l \times \epsilon_{fs} \times d^2, & \text{当 } d < d_0 \\ l \times E_{elec} + l \times \epsilon_{mp} \times d^4, & \text{当 } d \geq d_0 \end{cases} \quad (2)$$

(2) 式中 E_{elec} 为传感器节点发送或接收 l -

bit 数据的能耗, ϵ_{fs} 与 ϵ_{mp} 均为传输放大器的能耗, 当节点的传输距离小于临界距离 d_0 时, 能耗与距离的平方成正比; 反之, 能耗与距离的 4 次方成正比。临界距离 d_0 的计算公式如下:

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (3)$$

传感器节点接收 l -bit 数据所消耗的能量表达式如下:

$$E_{Rx}(l) = l \times E_{elec} \quad (4)$$

若一个分簇内共有 N 个节点, 单位 bit 的数据融合消耗的能量为 E_{DA} , 每个节点传输 l -bit 的数据到簇首共消耗的能量 E_C 公式如下:

$$E_C = N \times E_{DA} \times l \quad (5)$$

1.2 成簇阶段和数据传输阶段

基于距离均衡的自组织分簇算法的运行过程以一个轮为单位来描述, 在一个轮中把运行过程分为成簇阶段与数据稳定传输阶段。

1) 成簇阶段。基站在网络初始运行时设定一个簇首选举的权重阈值 TH_C , 此阈值将决定簇内节点是否能成为簇首候选节点。 TH_C 的大小将通过基站的 HELLO_MSG 广播给所有的节点, 假如节点收到此信息便会根据收到的 HELLO_MSG 信号强度来计算节点与基站间的距离, 随后进入簇首的选举过程。在初始阶段每个节点将预先计算自身的簇首选举权重 $W(i)$, 该权重取决于节点的剩余能量 $E_r(i)$ 与节点本身到基站的距离 $d_{to_BS}(i)$, 若节点计算的 $W(i)$ 大于 TH_C , 则表示该节点具有簇首的选举权, 设此节点为簇首候选节点; 若计算的 $W(i)$ 小于 TH_C , 设此节点为簇内节点。节点的距离权重 $W(i)$ 计算公式如下:

$$W(i) = \alpha \left[\left| \frac{d_{to_BS}(i)}{d_{opt}} - \left[\frac{d_{to_BS}(i)}{d_{opt}} \right] - 0.5 \right| \times 2 \right] + (1 - \alpha) \frac{E_r(i)}{E_0} \quad (6)$$

其中, α 是权重比例, d_{opt} 是预先设定的节点传输的最佳距离, 假如簇首的传输采用 d_{opt} , 可以让簇首减少传输延迟, 使得每个簇首传输的距离相等, 从而来均衡各簇首间的能量消耗, 进而延长簇首存活的时间。按 (6) 式定义的簇首选举权重 $W(i)$, 可以确保挑选出来的簇首候选节点拥有的能量较高于其他节点, 并且与基站或簇首间保持着一定的距离。成为簇首候选节点的节点此时将会计算自己簇首的等待时间, 节点的等待时间公式如下:

$$t(i) = \frac{c T_C}{W(i)} \quad (7)$$

其中, T_C 为簇首选举阶段的总时间, c 为常数, $W(i)$ 的数值越大的候选节点成为簇首的几率越高。簇首候选节点在 $t(i)$ 没有到达时将会等待其他节点的 HEAD_MSG, 若 $t(i)$ 结束仍没有收到其他节点的 HEAD_MSG, 表示在此范围内没有节点的 $W(i)$ 大于节点 i , 则设节点 i 为簇首, 同时在节点的选举半径 $R_c(i)$ 内广播 HEAD_MSG, 收到 HEAD_MSG 的候选者节点, 知道选举半径 $R_c(i)$ 内有节点的 $W(i)$ 大于自己, 则设该候选者节点为簇内节点, 这种方式可以避免分簇的覆盖区域重叠, 造成不必要的能量浪费。节点选举半径 $R_c(i)$ 的计算公式如下:

$$R_c(i) = \frac{d_{to_BS}(i) - d_{min}}{d_{max} - d_{min}} \times \frac{E_r(i)}{E} \times R_r \quad (8)$$

其中, d_{max} 与 d_{min} 分别是基站至网络区域的最远与最近距离, R_r 是节点预设的广播半径。越靠近基站的节点拥有的选举半径越小, 说明靠近基站的簇首数量将越多, 以增加中间节点的方式来解决能量洞的问题。而分簇半径与成员数量成正比关系, 为了避免能量不足的簇首有过多的簇内节点, 因此在设定选取半径时, 将考虑节点的剩余能量。在时间尚未到达 T_C 前, 簇内节点将持续接收周围的 HEAD_MSG, 当时间到达 T_C 时, 可以根据信号强

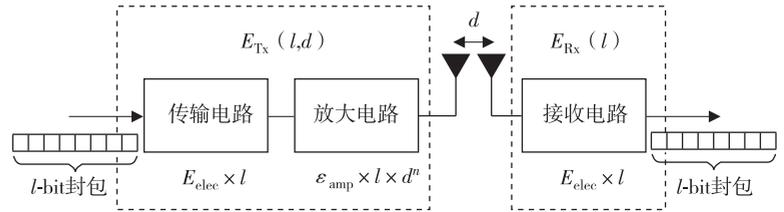


图 1 一阶无线电模型

Fig. 1 First order radio model

弱来判断自己与簇首的距离,选择最靠近自己的簇首并发送 JOIN_MSG 加入该分簇,此时簇首选举结束。

为了避免孤节点的情况发生,假如到达 T_c 时刻仍未收到 HEAD_MSG 的节点,将会把自身设为簇首,并直接把数据送往基站。簇首将于间隔时间 T_j 时段接收来自周围节点的 JOIN_MSG,并根据设定的传输时间表,在接收所有节点的信息后,用 SCHEDULE_MSG 通知所有的成员节点,至此成簇阶段结束。

2) 数据传输阶段。在数据传输阶段,根据簇首与基站的距离远近可将传输分为单跳传输与多跳传输。假如簇首离基站的小于所定义的距离阈值 TH_{dist} ,将数据进行单跳传输到基站,反之会进行多跳传输,将数据传输给中间节点后经多跳传输到基站。在多跳传输时,每个簇首将利用以下公式计算临时路由权重 $W_{relay_tmp}(j)$ 。

$$W_{relay_tmp}(j) = \gamma \frac{E_r(j)}{E_0} + (1-\gamma) \frac{1}{M(j)} \quad (9)$$

其中, γ 为权重比例, $M(j)$ 代表簇首所在簇的簇内节点数,当 $W_{relay_tmp}(j)$ 计算完成,簇首 j 通过 ROUTE_MSG 将 $W_{relay_tmp}(j)$ 广播给周围的簇首,其广播范围为 $2R_r$,所有的簇首会等待接收其他簇首所传输的 ROUTE_MSG,并取出收到的 ROUTE_MSG 中的 $W_{relay_tmp}(j)$ 来计算路由权重 $W_{relay}(j)$,然后将 $W_{relay}(j)$ 保存在路由表中,并选择最大路由权重的簇首作为下一节点。若再次收到 ROUTE_MSG,将会进行相同的计算流程,假如新的路由权重大于旧的路由权重,将会更新路由信息。簇首 j 的路由权重 $W_{relay}(j)$ 的计算公式如下:

$$W_{relay}(j) = \begin{cases} W_{relay_tmp}(j), & d_{ij} > d_0 \\ W_{relay_tmp}(j) + 1, & d_{ij} \leq d_0 \end{cases} \quad (10)$$

由(10)式可以发现簇首在挑选中间节点时,会尽量选择传输距离在 d_0 内的簇首,当簇首 i 到 j 的距离 d_{ij} 小于 d_0 时, $W_{relay_tmp}(j)$ 会加大路由权重,所以节点 j 会优先被选为中间节点。当各个簇首的路由确定之后,便开始进行数据传输,簇内节点依据设定顺序传输数据至簇首,簇首也依照本身路由表,传输数据到下一节点或者基站,整个运行过程的一个轮结束。

2 仿真实验

为评估 DBSOCA 的性能,利用 NS2 设计模拟实验的平台对其进行仿真,并将仿真结果与 LEACH 算法及 HEED 算法进行比较。仿真参数如表 1 所示。

图 2、图 3 的仿真结果是 DBSOCA 在 100 个与 150 个节点的网络拓扑中所产生的分簇分布情况,此结果证实了在不同密度的节点分布情况下都能达到最佳的分簇结果。此外在选举簇首时,采用了动态的簇首选举半径,越接近基站产生的分簇数量越多,越远则相反。

表 1 仿真参数

Tab.1 Parameters of simulation

参数	取值
网络区域	100×100 m ²
基站位置	(50,175)
节点数量	100,150
节点初始能量	2 J
数据包大小	500 bytes
E_{elec}	50 pJ/bit
ϵ_{fs}	10 pJ/(bit m ²)
ϵ_{mp}	0.001 3 pJ/(bit m ⁴)
E_{DA}	5 nJ/(bit m ²)
R_r	75 m
TH_c	0.8
TH_{dist}	130 m
d_{opt}	50 m

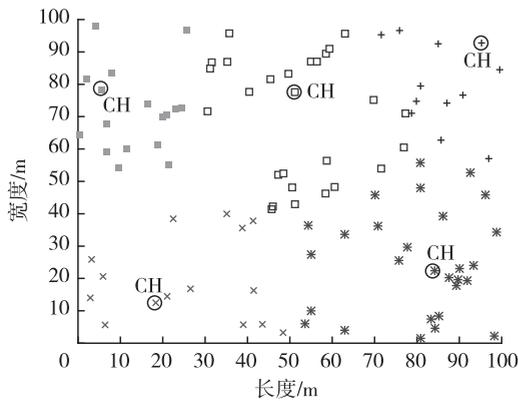


图 2 100 个节点下 DBSOCA 的分簇分布

Fig. 2 Dynamic clusters of DBSOCA in the 100-node random network

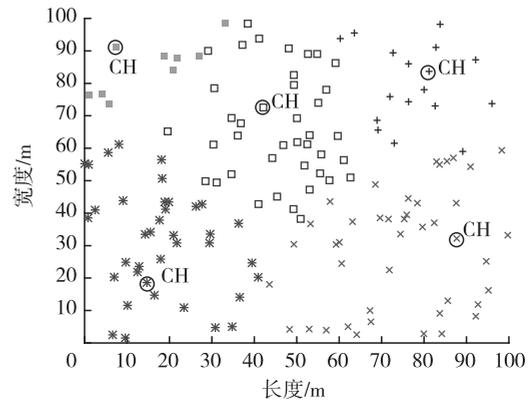


图 3 150 个节点下 DBSOCA 的分簇分布

Fig. 3 Dynamic clusters of DBSOCA in the 150-node network

图 4 是 100 个节点的平均剩余能量分析图。仿真结果显示,LEACH 算法过少的分簇导致了担任簇首的节点消耗大量能量,造成能量消耗曲线非常不平滑,HEED 算法采用基站统一分配各节点使得能量消耗曲线比较

平滑,但在簇首选举中单个节点的能量消耗较多,其生命周期与 LEACH 算法接近,而 DBSOCA 算法使用节能效益并采用参数来限制簇首传输的距离,使得簇首传输的能耗是 ϵ_{fs} 的 d^2 而不是 ϵ_{mp} 的 d^4 ,因此 DBSOCA 算法的生命周期要比前面两个算法长。图 5 为 150 个节点的平均剩余能量分析图,虽然增加节点数量,但 LEACH 算法与 HEED 算法能量消耗仍然非常迅速,其生命周期只延长了 1.15 倍,而 DBSOCA 算法延长了 1.47 倍,可以看出 DBSOCA 算法在不同密度的情况下,都能保持着相同的节能效果。

图 6、图 7 分别为 100、150 个节点的节点存活时间仿真图。在不同密度的网络拓扑中,通过分析网络生命周期的 3 个指标,由仿真结果可以看出不管是在第一个节点的耗尽能量的时间、半数节点可工作的时间,还是在最后节点耗尽能量的时间方面,DBSOCA 的节点存活时间都要比 LEACH 算法与 HEED 算法长,进而延长网络的生命周期。

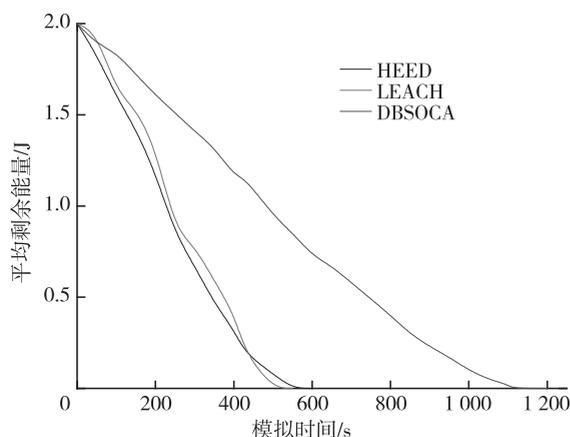


图 4 100 个节点的平均剩余能量分析图

Fig. 4 Average residual energy in the 100-node network

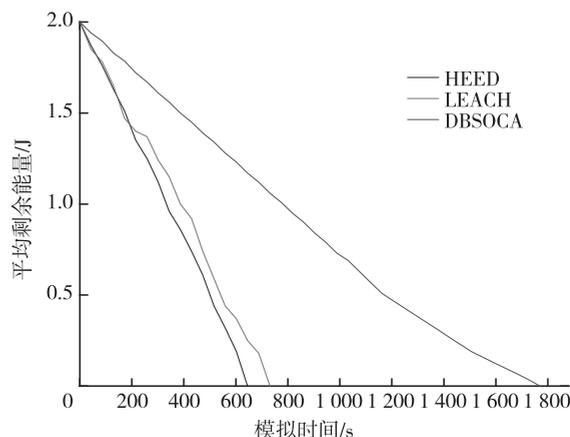


图 5 150 个节点的平均剩余能量分析图

Fig. 5 Average residual energy in the 150-node network

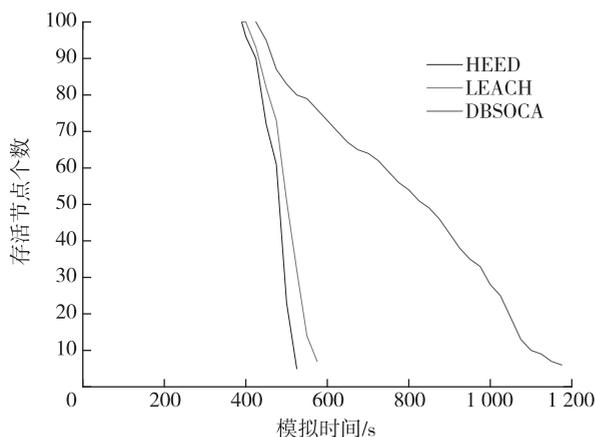


图 6 100 个节点的节点存活时间

Fig. 6 Number of alive nodes in the 100-node network

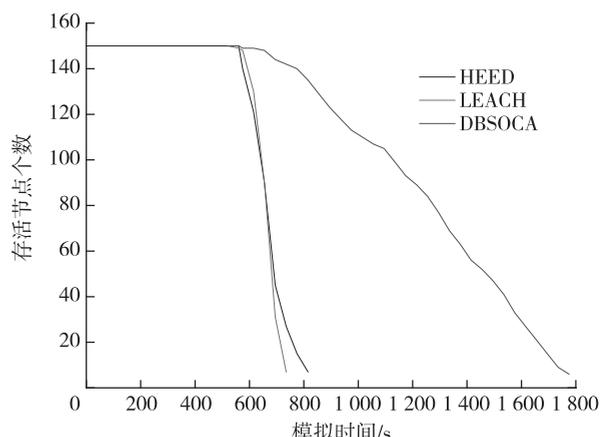


图 7 150 个节点的节点存活时间

Fig. 7 Number of alive nodes in the 150-node network

3 结语

提出的 DBSOCA 算法是一个节能分簇算法,能有效改善数据传输距离过远的问题。DBSOCA 算法通过设定参数来限制簇首的数量、位置和分簇大小,从而在数据传输阶段限制簇首数据传输的距离,并均衡分簇内与分簇间的能量消耗。在数据传输阶段使用簇首所在分簇的簇内节点数与剩余能量作为选择下一节点的标准,从而平衡了簇首的能耗。通过仿真实验,将仿真结果与 LEACH 算法、HEED 算法相比较,DBSOCA 算法有着更佳的生命周期、剩余能量,由此可以证明 DBSOCA 算法是一个比较好的分簇算法。

参考文献:

[1] KALIS A, KANATAS A G, EFTHYMOGLOU G P. A cooperative beamforming solution for eliminating multi-hop

communications in wireless sensor networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(7):

- 1055-1062.
- [2] LIU A F, WU X Y, CHEN Z G, et al. Research on the energy hole problem based on unequal cluster-radius for wireless sensor networks[J]. *Computer Communications*, 2010, 33(3):302-321.
- [3] YICK J, MUKHERJEE B, GHOSAL D. Wireless sensor network survey[J]. *IEEE Computer Networks*, 2008, 52(12):2292-2330.
- [4] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//*Proceedings of 33rd Hawaii international conference on system sciences*. Hawaii: Menlo Park, 2000.
- [5] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4):660-670.
- [6] YOUNIS O, FAHMY S, HEED. A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for Ad Hoc sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2004, 3(4):366-378.
- [7] LI C, YE M, CHEN G, et al. An energy-efficient unequal clustering mechanism for wireless sensor networks[C]//*Mobile adhoc and sensor systems conference*. Washington, DC:IEEE, 2005.
- [8] YU J, QI Y, WANG G. An energy-driven unequal clustering protocol for heterogeneous wireless sensor networks[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2011, 9(1):133-139.
- [9] SORO S, HEINZELMAN W B. Prolonging the life time of wireless sensor networks via unequal clustering[EB/OL]. (2016-02-01). <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/IPDPS.2005.365>.
- [10] 陈志军, 李明. 基于免疫退火的 WSN 簇首节点选择方法研究[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 31(2):72-76.
- CHEN Z J, LI M. Research on the cluster header selection method of WSN based on immune annealing[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2014, 31(2):72-76.
- [11] 张先超, 刘兴长, 钟一洋, 等. 基于 RSSI 和融合智能优化算法的无线传感器网络定位算法[J]. *重庆理工大学学报(自然科学版)*, 2015(9):116-121.
- ZHANG X C, LIU X C, ZHONG Y Y, et al. Wireless sensor networks locating algorithm based on RSSI and Hybrid intelligent optimization algorithm[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2015(9):116-121.
- [12] 杨北亚, 熊辉, 丁宏, 等. 应用 NLOS 鉴别补偿的无线传感器网络 TDOA 定位算法[J]. *重庆理工大学学报(自然科学版)*, 2015(10):120-126.
- YANG B Y, XIONG H, DING H, et al. TDOA localization algorithm based on NLOS error identification and compensation in wireless sensor network[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2015(10):120-126.
- [13] 曹建玲, 余俊, 王路路, 等. 一种能量高效的无线传感器网络分簇路由协议[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2014, 26(2):150-154.
- CAO J L, YU J, WANG L L, et al. An energy-efficient clustering routing protocol for wireless sensor networks[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2014, 26(2):150-154.
- [14] SMARAGDAKIS G, MATTA I, BESTAVROS A. SEP: a stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks[J]. *Second International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications*, 2004, 3(4):1-11.

Distance-balanced Self-organization Clustering Algorithm of Wireless Sensor Network

WU Zhonghua

(College of Information and Intelligence Engineering, Nantong Science and Technology College, Nantong Jiangsu 226007, China)

Abstract: [Purposes] Aiming at the problem of saving energy and prolonging the life cycle of the network, this paper proposes a Distance-Balanced Self-Organization Clustering Algorithm (DBSOCA) which can effectively reduce the energy consumption of node transmission based on the deficient analysis of typical clustering algorithm. [Methods] In this algorithm, a sensor node will calculate its distance from the base station(BS) and use this distance as a factor for selecting the CH to ensure an even distance between the BS and the CHs and between each CHs. [Findings] The even transmission distance was used to avoid unequal energy consumption caused by different transmission distances between the CHs. [Conclusions] The simulation results demonstrate that the algorithm can effectively reduce the energy consumption of the whole network and prolong the lifetime of the network.

Keywords: distance-balanced; self-organization; clustering; wireless sensor network

(责任编辑 游中胜)