基于相对距离的多级能量异构传感器网络成簇算法

刘 唐[1] 汪小芬[2] 杨 进[3]
(四川师范大学基础教学学院 成都 610068)[1] (电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)[2]
(乐山师范学院计算机学院 乐山 614000)[3]

摘 要 延长网络寿命并获得更好的监控质量是无线传感器网络成簇算法的重要性能指标。在分析现有主要成簇算法的基础上,提出了一种适应于多级能量异构传感器网络的基于相对距离的成簇算法 RDCA(Relative Distance Clustering Algorithm)。算法中,节点根据通信范围内其他节点与自身的平均距离、节点自身与基站的距离以及节点当前剩余能量来确定节点成为簇头的概率。所有节点轮流成为簇头,以分摊能量消耗。仿真实验结果表明,与现有主要聚簇算法相比,在多级能量异构环境下,新的成簇算法拥有更长的生存时间和更优的网络监测质量。

关键词 无线传感器网络,异构环境,成簇算法,相对距离
中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Relative Distance-based Clustering Algorithm for Multilevel Energy Heterogeneous Wireless Sensor Networks

LIU Tang[1] WANG Xiao-fen[2] YANG Jin[3]
(College of Fundamental Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China)[1]
(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China)[2]
(Department of Computer Science, Leshan Normal University, Leshan 614000, China)[3]

Abstract Prolonging network lifetime and obtaining better monitor quality are important performance indexes to the clustering algorithm for wireless sensor networks. Based on the analysis of the existing clustering algorithms, a relative distance clustering algorithm which adapts to multi-level energy heterogeneous sensor networks was proposed. For this algorithm, nodes decide the possibility of becoming cluster heads based on their average distance from other nodes, the distance from the base station and their own current residual energy. All nodes take turns to become cluster heads to share energy consumption. Simulation results show that in multi-level energy heterogeneous sensor networks, compared with the existing algorithms, this new clustering algorithm can prolong the lifetime and has better network monitor quality.

Keywords Wireless sensor network, Heterogeneous environment, Clustering algorithm, Relative distance

1 引言

近年来,随着无线通信、微机电系统技术的发展,由装配了大量小型能量装置节点组成的无线传感器网络(WSN, Wireless Sensor Network)成为了研究的热点[1,2]。由于无线传感器网络的随机一次性部署方式[3],使得其能耗问题尤为突出[4],因此无线传感器网络的最重要目标就是降低网络运行的能量消耗和延长网络的生命周期。

异构传感器网络 HWSN(Heterogeneous Wireless Sensor Networks)由多种不同类型的传感器节点构成[5]。事实上,无线传感器网络的异构性是非常常见的。将传感器节点组织成簇的形式可高效利用网络中的能量资源,最大限度地减少冗余数据在网络内的传输,许多能量有效的路由协议都是在簇结构的基础上进行设计的。当前提出了许多分布式聚簇协议,根据协议所适应的传感器网络是同构网络还是异构网络,可以将这些成簇协议分为同构聚簇协议和异构聚簇协议。

Hernzelman 等人在文献[6]提出了 LEACH 簇选择算法,该算法设定每个节点具有相同的初始能量。节点随机产生一个 0-1 之间的随机概率。LEACH 按轮运行,每轮包括初始化和稳定运行 2 个阶段。初始化阶段,算法进行簇头选择。每一轮选举大约 $p_{opt}\times N$ 个簇头节点,其中 p_{opt} 为优化簇头比例。对任意节点 i,若概率小于概率门限 $T(i)$,则其成为簇头。

当簇生成以后,簇头将聚合其收到的各成员节点的采集信息,并将聚合信息直接传输到基站。但是,LEACH 只适合同构网络环境。在异构网络中,LEACH 可能会使低能量的节点比高能量节点拥有更大的概率成为簇头节点。

文献[7]对 LEACH 算法进行了改进,并提出了一种根据节点剩余能量选举簇头的算法 LEACH-E,但是该算法难以分布式实现。文献[8]针对二级异构网络提出 SEP 算法,但

到稿日期:2011-09-01 返修日期:2011-11-22 本文受国家自然科学基金项目(61003310),四川省教育厅科研项目(10ZB005)资助。
刘 唐(1980—),男,硕士,讲师,CCF 会员,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:crikey@163.com;**汪小芬**(1982—),女,博士,讲师,主要研究方向为信息与网络安全;**杨 进**(1980—),男,博士,副教授,主要研究方向为网络安全。

SEP 并不适用于多级异构网络环境。

文献[9]针对异构环境，提出了 EEHC 协议。EEHC 协议根据节点的初始能量确定节点成为簇头的可能性。文献[10]则构建了一个具有两类节点的异构网络模型，两类节点具有不同的初始能量和不同的数据发送能力。在该异构环境下，提出了一种基于能量消耗预测和成簇管理的可靠数据传输协议 EDFCM。

本文提出了一种适用于多级能量异构传感器网络的基于相对距离的成簇算法 RDCA(Relative Distance Clustering Algorithm)。RDCA 通过将所有节点轮流成为簇头节点来达到均匀消耗能量的目的。首先该算法通过节点广播获得各节点间的距离，为尽量减小簇内通信代价，该算法考察了节点通信范围内其他节点与该节点的平均距离；为尽量减小簇头与基站通信时的能耗，该算法考察了节点到基站的距离；最后加入节点能量因素，得到网络中节点成为簇头节点的选举概率。仿真实验结果显示，RDCA 算法能获得比 LEACH、SEP、LEACH-E 等主要成簇算法更长的网络生存时间和更优的网络监测质量。

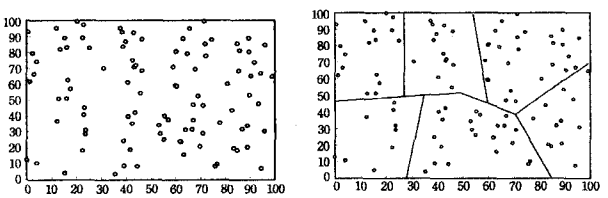
2 系统模型

2.1 网络模型

本文设定 N 个传感器节点随机分布在一个 $M\times M$ 的正方形区域内。传感器节点采集数据发送到基站，所有节点部署后不再移动。所有节点能量异构，能量在$[E_{\min},E_{\max}]$范围内随机分布，其中 $E_{\min}$是节点的能量下限，$E_{\max}$是节点的能量上限。对任意节点 i，其初始能量为 E_i。

节点通信链路对称；节点没有任何位置信息，但是节点可根据接收信号的强度计算出发送节点的相对距离。网络采用分簇拓扑控制结构，基站执行数据的融合功能，网络内基站唯一，且无需考虑基站能量消耗。

图 1(a)给出了 100 个能量异构节点随机分布在 100m×100m 的正方形区域中的网络模型，图 1(b)给出了采用 RDCA 算法所形成的网络分簇结构。可以看出，根据网络内各节点间的不同距离以及节点当前的剩余能量，RDCA 算法将网络分为了若干簇。



(a) 100 个异构节点随机分布的网络模型　　(b) RDCA 算法形成的网络分簇结构

图 1

2.2 能量模型

节点能量消耗由简单能量消耗模型[11]决定：

$$E_{Tx}(l,d)=E_{Tx_elec}(k)+ET_{Tx_amp}(l,d)=\begin{cases}lE_{elec}+l\varepsilon_{fs}d^2, & d<d_0\\ lE_{elec}+l\varepsilon_{mp}d^4, & d\geqslant d_0\end{cases}\tag{1}$$

$$E_{Rx}(l)=E_{Rx_elec}(l)=lE_{elec}\tag{2}$$

式中，$E_{Tx}(l,d)$为发送端能耗，$E_{Rx}(l)$为接收端能耗。E_{elec} 表示发送或接收每比特数据时的能量消耗，d_0 为通信阈值，$\varepsilon_{fs}d^2$ 和 $\varepsilon_{mp}d^4$ 是发送每比特数据放大器的能量消耗。显然，当网络中消息长度一致时，节点能耗与节点间的相对距离直接相关。

3 RDCA 算法设计

3.1 节点间距离计算

网络中节点可利用信号强度在传输过程中的衰减来感知相互距离。在成簇初始阶段，网络中所有节点使用一定的传输能量进行广播。若节点 i 以 E_{i_t} 向其他节点广播信息，接受到该信息的节点 j 则可以根据接受信号强度 E_{i,j_r} 计算出两节点的相对距离[11]：

$$d_{i,j}=\sqrt[\alpha]{\frac{K\times E_i^{tran}}{E_{j,i}^{rec}}}\tag{3}$$

式中，$d_{i,j}$是节点 i 和节点 j 之间的相对距离，K 是常数，α 是距离-能量梯度，根据传感器网络所处的距离物理环境，α 取值范围在 1～6 之间。

在网络初始阶段，基站以固定功率进行广播，每个节点根据收到能量的衰减同样可以方便地计算出到基站的距离。对任意节点 i，以 $d_{i,BS}$ 表示 i 到基站的距离。

3.2 簇头节点选择

RDCA 算法按轮运行。首先是初始化阶段，产生簇头节点，并形成若干个簇；然后是稳定阶段，簇内节点将收集到的信息发送到簇头节点，簇头完成数据融合后再将其发送给基站。

设 p_{opt} 表示优化簇头比例，p_i 表示节点 i 当前成为簇头的选举概率。令 d_{toBS} 表示簇头到基站的平均距离，d_{toCH} 为簇内成员节点到簇头节点的平均距离，可以得到[7,12]：

$$d_{toBS}=0.765\frac{M}{2}\tag{4}$$

$$d_{toCH}=\frac{M}{\sqrt{2\pi k}}\tag{5}$$

根据文献[13]，可计算出优化簇头数为：

$$k_{opt}=\frac{\sqrt{N}}{\sqrt{2\pi}}\sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mp}}}\frac{M}{d_{toBS}^2}\tag{6}$$

因此，优化簇头比例 p_{opt} 为：

$$p_{opt}=\frac{k_{opt}}{N}\tag{7}$$

任一节点 i，其可通信范围内共有节点 n 个。为节省能量开销，簇内进行一次数据通信消耗的能量越少越好。由式(1)、式(2)可知，若簇内节点到簇头的平均距离越短，则簇内通信能耗越少。令$\sum=\{\psi|1\leqslant z\leqslant Z'\}$代表 i 通信范围内 Z'个节点的集合，这 Z'个节点到 i 的平均距离 $D_{z,i}$ 为：

$$D_{z,i}=\frac{\sum_{i=1}^{z'}d_{z_j,i}}{z'}\tag{8}$$

考察 D_{z_i} 与网络中簇内成员节点到簇头节点的平均距离 d_{toCH} 的比值，该比值越小，节点 i 成为簇头的可能性越大。

簇头除了接受簇内节点采集的数据，还要负责将这些数据融合后发送到基站，若节点距离基站较近，则发送数据到基站所消耗的能量更少。因此，若节点到基站的距离比其通信范围内其他 Z'个节点到基站的平均距离 $D_{z,BS}$ 更小，则该节点成为簇头的可能性越高。

$$D_{z,BS}=\frac{\sum_{i=1}^{z'}d_{z_j,BS}}{z'}\tag{9}$$

因此，考虑节点相对距离因素后，节点 i 成为簇头节点的概率 p_i' 为：

$$p_i' = p_{opt} \times \frac{d_{toCH}}{D_{z,i}} \times \frac{d_{i,BS}}{D_{z,BS}} \tag{10}$$

进一步考虑节点能量因素，如节点拥有更多的能量，则它就有更大的机率成为簇头。节点 i 通信范围内的节点所拥有的平均能量为：

$$\overline{E_{Z_I}} = \frac{\sum_{i=1}^{z'} E_{z_j}}{z'} \tag{11}$$

因此，此时加入能量因素后节点 i 成为簇头节点的概率 p_i 为：

$$p_i = p_i' \times \frac{E_i}{\overline{E_{Z_I}}} \tag{12}$$

图 2 给出了在网络初始化后，网络内产生一个分簇的结构示意图。实线表示簇内各成员节点与簇头节点的距离，虚线表示簇头节点与基站的距离。可以看出，RDCA 算法所产生的簇头节点 i 位于分簇的相对中央位置，此时 i 通信范围内的 Z' 个节点到 i 的平均距离 $D_{z,i}$ 相对较小，并且簇头节点与基站的距离也小于簇内多数节点。因此，簇内进行一次数据通信的能耗与簇头节点将收集的数据发送到基站所产生的能耗之和最小。

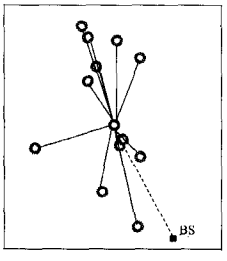


图 2　簇结构示意图

针对 LEACH 中门限值 $T(i)$ 计算公式的不足，根据多级能量异构网络的特点，对此进行改进：

$$T(i) = \begin{cases} \dfrac{p_i}{1-p_i(r \bmod \frac{1}{p_i})}\left[\dfrac{d_{toCH}}{D_{z,i}} \times \dfrac{d_{i,BS}}{D_{z,BS}} \times \dfrac{E_i}{\overline{E_{Z_I}}} + (r_s div \dfrac{1}{p_i}) \right. \\ \left. (1 - \dfrac{d_{toCH}}{D_{z,i}} \times \dfrac{d_{i,BS}}{D_{z,BS}} \times \dfrac{E_i}{\overline{E_{Z_I}}})\right], & \text{if } i \in G \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{13}$$

式中，r_s 表示节点连续未当选过簇头的轮次。一旦当选簇头，r_s 就重置为 0。

在 RDCA 算法中，簇头节点产生的流程如图 3 所示。

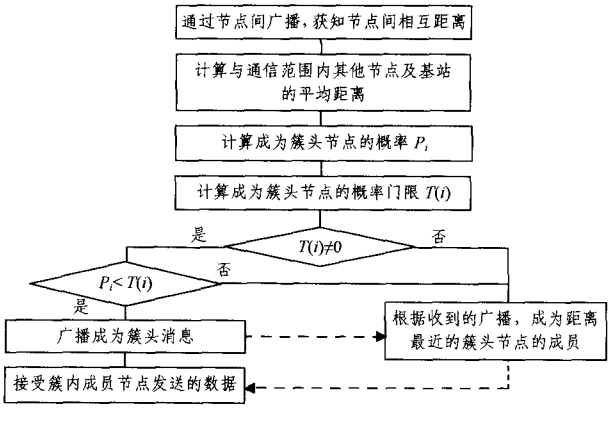


图 3　簇头节点产生流程图

4　仿真实验

4.1　仿真环境

为了评价和分析 RDCA 的性能，本文使用 Matlab 进行仿真实验。实验环境如下：100 个传感器节点随机均匀散布于 100m×100m 的正方形区域，基站位于网络中心，忽略信号碰撞和无线信道干扰等随机因素的影响，实验中使用的其他重要参数见表 1。本文比较 RDCA 与 LEACH、SEP 和 LEACH-E 等算法的性能。所有的实验结果如未特别说明，均为 100 次独立实验结果的均值。

表 1　仿真实验参数表

参数	值
d_0(m)	75
节点初始能量(J)	1～3
E_{elec}	5nJ/bit
ε_{fs}	10pJ/bit/m^2
ε_{mp}	0.0013pJ/bit/m^4
消息大小	4000bits

4.2　实验结果及分析

仿真实验首先考察默认网络环境下，RDCA 与 LEACH、SEP 和 LEACH-E 算法死亡节点数量随时间的变化情况。

图 4 的仿真结果显示了各个算法在默认实验环境下，死亡节点数量随时间的演化结果。可以看到，在异构环境下，LEACH 算法节点生存时间最短，节点按照固定的速率死掉。SEP 和 LEACH-E 算法节点生存时间长于 LEACH 算法。由于 RDCA 算法充分考虑了节点间相对距离对能量消耗的影响，使网络能耗被均匀地分布到异构网络的各个节点上，因此第一个节点和最后一个节点的死亡时间较为接近，RDCA 算法的曲线也是一条相对于 X 轴斜率更低的直线。

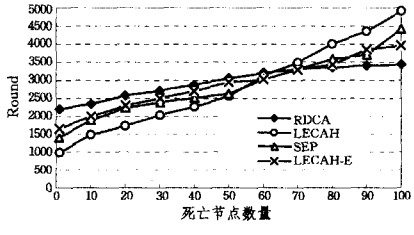


图 4　节点死亡时间图

文献[13]定义，在 10% 的节点死掉以前，网络可向基站传回高质量和高可靠的数据。因此，改变异构节点在网络中的比例，并观察各个算法的稳定周期。这里设定非异构节点初始能量均为 2J。

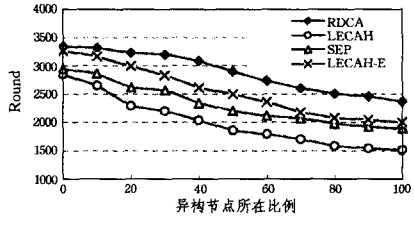


图 5　异构节点比例变化时网络稳定周期图

从图 5 可看出，LEACH 协议不能很好地利用异构节点带来的额外能量，其稳定周期很短，节点按照固定的速率死掉。SEP 由于考虑到节点具有不同初始能量，从而获得了比 LEACH 更长的稳定周期。同时 LEACH-E 还考虑了节点的

（下转第 125 页）

AODV 协议路由开销、吞吐率等性能的影响，得到路径损耗门限值，并基于此实现了协作 AODV 路由算法，进而基于队列长度和跳数提出了一种改进的无线 TCP 拥塞控制策略。在 LTE 网络的链路级仿真实验中，验证了所提基于协作路由协议的拥塞控制机制的有效性。在数学分析和仿真实验中，将其平均丢包数、队列长度抖动、时延、时延抖动和吞吐率等与传统的 TCP 拥塞控制机制进行了对比，结果表明所提拥塞控制机制具有更好的性能。

参 考 文 献

[1] Ahmavaara K, Haverinen H, Pichna R. Interworking architecture between 3GPP and WLAN systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(11): 74-81

[2] Bai R, Singhal M. DOA: DSR over AODV Routing for Mobile Ad Hoc Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(10): 1403-1416

[3] Cerri D, Ghioni A. Securing AODV: the A-SAODV secure routing prototype[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(2): 120-125

[4] Nakayama H, Kurosawa S, Jamalipour A, et al. A Dynamic Anomaly Detection Scheme for AODV-Based Mobile Ad hoc Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(5): 2471-2481

[5] Pereira N C V N, de Moraes R M. LatinCon05-Comparative Analysis of AODV Route Recovery Mechanisms in Wireless Ad Hoc Networks[J]. IEEE Latin America Transactions (Revista IEEE America Latina), 2010, 8(4): 385-393

[6] Kum D-W, Le A-N, Cho Y-Z, et al. An Efficient On-Demand Routing Approach with Directional Flooding for Wireless Mesh Networks[J]. Journal of Communication and networks, 2010, 12(1): 67-73

[7] Stuckey N C, Vasquez J R, Graham S R, et al. Stochastic control of computer networks[J]. IET Control Theory & Applications, 2012, 6(3): 403-411

[8] Shi Z, Ionescu D, Zhang D. Packet Loss Control Using Tokens at the Network Edge[J]. IEEE Latin America Transactions (Revista IEEE America Latina), 2012, 10(1): 1391-1393

[9] Ariba Y, Gouaisbaut F, Rahme S, et al. Traffic monitoring in transmission control protocol/active queue management networks through a time-delay observer[J]. IET Control Theory & Applications, 2012, 4(6): 506-517

[10] 梁柱. 组播拥塞控制策略设计与仿真研究[J]. 重庆邮电大学学报：自然科学版，2009，21(5)：642-646

(上接第 121 页)

初始能量和剩余能量的差异。而 RDCA 通过节点的相对距离保证簇内通信代价，并考虑到了簇头与基站的通信代价，因此在节点全部异构的情况下，RDCA 比 SEP 和 LEACH-E 增加了 25%和 18%的稳定周期长度。

可利用基站收到的消息总数来评价算法的监控性能。图 6 描绘了在所有节点异构、50%的节点为数据获取规律性节点、10%的节点处于故障节点的网络中时，RDCA 算法在相当长的时间内基站收到的消息数量成线性增长，而其他算法在较早时间基站收到的消息数量增长速率便开始下降。

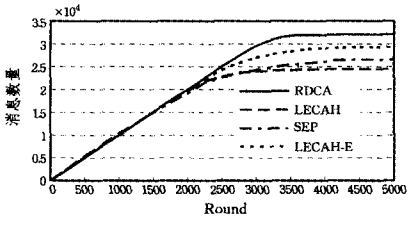


图 6 基站收到的消息数量

结束语 本文在多级能量异构环境下，提出了一个基于节点相对距离的成簇算法 RDCA。RDCA 根据节点间相对距离、节点到基站的距离以及节点当前能量来获得节点成为簇头的概率。仿真实验验证了该算法的有效性和良好的性能。

参 考 文 献

[1] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114

[2] 刘唐，彭舰，王建忠，等. 延迟容忍移动传感器网络中基于节点优先级的数据转发策略[J]. 计算机科学，2011，38(3)：140-143

[3] 任丰原，黄海宁，林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报，2003，14(7)：1282-1291

[4] 沙超，王汝传，黄海平，等. 基于生命期划分的无线传感器网络节能策略[J]. 通信学报，2010，31(4)：1-7

[5] de Freitas E P, Heimfarth T, Pereira C E. Evaluation of coordination strategies for heterogeneous sensor networks aiming at surveillance applications [C] // Proceedings of IEEE Sensors (SENSORS). 2009: 591-596

[6] Dietrich I, Dressler F. On the lifetime of wireless sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2009, 5(1): 1-39

[7] Heinzelman W R, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670

[8] Smaragdakis G, Matta I, Bestavros A. SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks [C]//Proc. of the Int'l Workshop on SANPA 2004. 2004

[9] Dilip K, Trilok C A, Patel R B. EEHC: energy efficient heterogeneous clustered scheme for wireless sensor networks [J]. Compter Communications, 2009, 32(4): 662-667

[10] Zhou H B, Y M, Hu Y Q, et al. A novel stable selection and reliable transmission protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2010, 33(15): 1843-1849

[11] Doshi S, Bhandare S, Brown T. An on demand minimum energy routing protocol for a wireless ad hoc network[J]. ACM SIGMOBIL E Mobile Computing and Communications Review, 2002, 6(3): 50-66

[12] Mhatre V, Rosenberg C. Design guidelines for wireless sensor networks: communication, clustering and aggregation[J]. Ad hoc Network Journal, 2004, 2(1): 45-63

[13] 卿利，朱清新，王明文. 异构传感器网络的分布式能量有效成簇算法[J]. 软件学报，2006，17(7)：481-489