

异构 WSN 中能耗偏差协调的分簇算法

黄瑞玲, 张 伟

(江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘 要: 针对异构无线传感器网络中的能量消耗不均匀, 能量利用率偏低的问题, 提出了基于能耗偏差协调的分簇算法(CDEC)。该算法充分利用网络异构性的特点, 通过引入节点能耗偏差度 β 及其协调参数 λ , 对簇头选举的门限值及簇头轮换的条件进行实时调整, 以达到均衡网络能耗、降低额外能耗的目的。仿真结果表明, CDEC 分簇算法使得网络中能量的消耗更加均衡合理, 显著延长了网络寿命, 提高了网络的吞吐率。

关键词: 无线传感器网络; CDEC 分簇算法; 偏差度; 簇头轮换; 网络寿命

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)12-4674-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.12.070

Clustering algorithm based on coordinating deviation of energy consumption in heterogeneous wireless sensor network

HUANG Rui-ling, ZHANG Wei

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

Abstract: In order to solve the common problem that energy consumption was always unbalanced and inefficiency in heterogeneous wireless sensor networks, this paper presented a novel clustering algorithm based on coordinating deviation of energy consumption. It could real-time adjust the cluster head selection threshold and the requirement of cluster head rotation by introducing β called deviation degree of node energy consumption and its adjustment parameter λ , so as to achieve better balance energy consumption and reduce the additional energy consumption. The simulation results show that the new algorithm achieves the better balance energy consumption and more energy efficiency of the network, then dramatically prolongs the network lifetime and improves the network throughput.

Key words: wireless sensor network; CDEC-clustering algorithm; deviation degree; cluster head rotation; network lifetime

0 引言

高效地使用传感器节点的能量, 延长网络的生存时间, 是传感器网络拓扑控制的首要设计目标。如何设计合理、有效的机制来分簇和选择簇头节点是层次型拓扑控制研究中最基础、最重要的问题^[1]。低功耗自适应集簇分层型协议(low energy adaptive clustering hierarchy, LEACH)^[2]是最具有代表性的、以分簇为基础的层次型拓扑控制算法。LEACH 算法将网络节点划分成簇, 簇中各节点独立地按照随机概率决定是否充当簇头, 并通过周期性地簇头选择和网络自组织过程避免了簇头节点能耗过多的问题, 有效地平衡了网络负载, 节约了节点间通信的能量消耗, 能使网络能量得到均衡、合理的利用, 起到了延长网络生存周期的作用。但是, LEACH 算法在选择簇头时具有随机性, 并没有考虑节点的初始能量、剩余能量、分布位置等问题, 这使得算法选择的簇头仍然有分布不均、节点能耗不均等问题, 影响了网络生存时间^[3~5]。DEEC 分簇算法假定网络是多级异构的, 它克服了 LEACH 只适用于同构网络的缺点^[6]。DEEC 算法考虑了在实际应用中网络由不同类型的节点组成的可能性, 即少数节点具有较高的计算能力和较多的初始能量^[7], 通过对不同能量级的节点设置不同的概率门限值, 使能量级高的节点当选簇头的概率增大。DEEC 算法从一定程度上均衡了

异构网络中的能量消耗, 延长了网络寿命。但 DEEC 算法只从初始能量差异的角度出发选择簇头, 并不能解决因网络运行导致的能耗不均的问题。并且每轮稳定数据传输结束后都需要重新成簇, 导致了维护成簇过程中产生比较高的额外能耗, 而网络能量利用率不高^[8]。

针对以上问题, 本文提出了异构 WSN 中基于能耗偏差协调的 CDEC 算法。通过引入异构网络中的节点能耗偏差度 β 的新定义和能耗偏差度协调参数 λ , 使网络中的节点根据能耗情况动态调整节点当选簇头的概率门限值以及簇头的轮换频率, 以达到均衡网络能量消耗和延长网络寿命的目的。

1 CDEC 算法

1.1 网络模型

网络由 N 个传感器节点随机分布在一个正方形监测区域内, 周期性地收集周围环境中的信息并发送给汇聚节点。该网络具有如下性质:

- 汇聚节点 sink 固定位于区域的中心位置, 且能量不受限制。
- 所有传感器节点都有一个唯一的 ID, 并且部署后不再移动。

收稿日期: 2012-04-19; 修回日期: 2012-05-28

作者简介: 黄瑞玲(1987-), 女, 河南鹤壁人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络技术(huangruiling2006@163.com); 张伟(1956-), 男, 副教授, 硕导, 主要研究方向为软件工程、无线传感器网络。

c) 所有节点都具有数据融合的能力。

d) 节点的初始能量各不相同, 随机分布在闭区间 $[E_o, E_o(1+\alpha)]$, 节点可以根据它与接收方的距离, 调节发射功率以节省能量。

e) 链路是对称的, 节点可以依据接收信号的强度计算出发射者距自己的距离。

1.2 能耗模型

采用简化的无线电硬件能量消耗模型^[9], 节点发送 l bit 数据包需要消耗的能量为

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d^2 & d < d_{crossover} \\ lE_{elec} + l\epsilon_{mp}d^2 & d \geq d_{crossover} \end{cases} \quad (1)$$

其中: E_{elec} 表示发射或接收电路传输 1 bit 数据损耗的能量; $d_{crossover} = \sqrt{\epsilon_{fs}/\epsilon_{mp}}$ 为距离阈值, 若传输距离小于 $d_{crossover}$, 则功率放大损耗采用自由空间模型, 若传输距离大于等于 $d_{crossover}$, 采用多路衰减模型; ϵ_{fs} 、 ϵ_{mp} 分别为两种模型中功率放大所需能量。

E_{DA} 为融合每 bit 数据的能耗, 那么节点融合 l bit 数据包需要消耗的能量为

$$E_{DA}(l) = lE_{elec} \quad (2)$$

设 $\overline{E_{round}}$ 为网络运行中每轮的平均能耗, 若每一轮都要重新成簇, 则每轮传输 L bit 数据的网络总能耗包括用于有效数据传输的能量 E_{every} 和用于成簇时的额外能耗 $E_{overhead}$; 若不重新成簇则只消耗有效数据传输的能耗。 d_{toBS} 为节点到基站的平均距离, d_{toCH} 为节点到簇头的平均距离, 设每轮簇头数目为 k , 可求 $\overline{E_{round}}$ 近似值得:

$$\overline{E_{round}} = E_{every} + E_{overhead} \approx L(2NE_{elec} + NE_{DA} + k\epsilon_{mp}d_{toBS}^4 + N\epsilon_{fs}d_{toCH}^2) \quad (3)$$

由于所给网络中传感器节点的初始能量随机分布在闭区间 $[E_o, E_o(1+\alpha)]$, 设节点 s_i 的初始能量为 $E_o(1+\theta_i\alpha)$, 其中 $\theta_i \in [0, 1]$ 。那么可以计算网络的总能量为

$$E_{total} = \sum_{i=1}^N E_o(1+\theta_i\alpha) = E_o(N + \alpha \sum_{i=1}^N \theta_i) \quad (4)$$

为了避免在网络运行中每个节点都需要获取全局网络的能量消耗情况, 网络在 r 轮时的平均剩余能耗 $\overline{E}(r)$ 值的获取采取类似文献[10]的预估网络能量的算法:

$$\overline{E}(r) = \frac{1}{N} E_{total} \left(1 - \frac{r}{R} \right), R = \frac{E_{total}}{\overline{E_{round}}} \quad (5)$$

1.3 CDEC 算法描述

CDEC 算法将整个网络生存时间划分成不同的轮, 每一轮包括簇的建立和稳定的数据传输阶段。CDEC 算法在簇头选择过程引入评价网络节点能耗均衡情况的能耗偏差度 β , 节点的 β 值越大, 当选簇头的概率越大。在第一轮选择簇头时, 根据异构网络初始能量分布情况, 由节点的能耗偏差度用式(10)计算其当选簇头的门限值。节点当选簇头后, 向周围广播一个信息, 消息包括节点剩余能量和其状态信息。普通节点根据接收到的信号强度和簇头节点的剩余能量情况, 选择距其较近、剩余能量多的节点入簇。形成簇后, 节点进入稳定数据传输阶段, 每个成员节点在给定的时隙内采集数据, 并根据自己与簇首的距离调整发射功率, 将数据发送给簇头节点, 其他时间则关闭收发电路, 以节省能量, 而簇头将数据融合后直接发给基站。CDEC 算法为了降低簇生成中的额外能耗, 在一轮稳定数据传输之后, 并不直接进入下一轮的簇生成阶段, 而是计算当前簇头节点能耗偏差的变化情况, 用能耗偏差协调参数

λ 调节: 若 $\beta_i' < \lambda\beta_i$ ($\lambda > 0$), 则进入下轮的簇形成阶段; 否则, 直接沿用上轮的簇结构进入稳定数据传输阶段。

1.3.1 簇头选择

簇头节点需要收集、处理簇成员节点检测到的数据, 还要负责转发数据, 因而簇头的合理选择至关重要。同时, 簇头节点的数目对网络的生存周期是至关重要的。簇头节点过少时, 一个簇所覆盖的区域会过大, 成员节点到簇头的距离会较远, 传输数据的能耗会很大; 簇头数目过多时, 由于簇头节点的能耗大于非簇头节点, 会导致整个网络能耗较大, 并且因为冗余数据太多降低网络吞吐量。

通过选举最优个数的簇头节点, 可使网络在每一轮簇重构过程中的能量消耗最小, 即使式(3)中 $\overline{E_{round}}$ 达到极小值的 k 值点。在其他网络参数已设定的情况下, 当 $k > 0$ 时, 由式(3)知 $\overline{E_{round}}$ 是关于 k 的连续函数, 那么对式(3)关于 k 求导并令其等于 0, 可计算出 $\overline{E_{round}}$ 的极值点, 即最优簇头数目:

$$k_{opt} = \sqrt{\frac{N}{2\pi}} \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \frac{M}{d_{toBS}^2}, p_{opt} = \frac{k_{opt}}{N} \quad (6)$$

CDEC 算法在簇头选举中, 将 k_{opt} 的计算交由计算能力很强的基站完成。CDEC 算法为了保证网络中所有节点的能量均衡利用, 由节点的能耗偏差度来确定其成为簇头的概率门限值, 如式(10)所示。

定义 能耗偏差度 β_i 。设网络节点 s_i 剩余能量为 $E_i(r)$, 第 r 轮时网络的平均剩余能量为 $\overline{E}(r)$, 那么节点的能量偏差为 $\Delta E_i(r) = E_i(r) - \overline{E}(r)$, 节点能耗偏差度 β_i 为节点能量偏差与 $\overline{E}(r)$ 的比值, 即

$$\beta_i = \frac{(E_i(r) - \overline{E}(r))}{\overline{E}(r)} = \frac{\Delta E_i(r)}{\overline{E}(r)} \quad (7)$$

节点 s_i 当选簇头节点的平均概率 $p(i)$ 计算式如下:

$$p(i) = p_{opt} \left(1 + \frac{(E_i(r) - \overline{E}(r))}{\overline{E}(r)} \right) = p_{opt} \left(1 + \frac{\Delta E_i(r)}{\overline{E}(r)} \right) = p_{opt} (1 + \beta_i) \quad (8)$$

由以上分析可知, 最优的簇头数目可以使网络每轮能耗达到极值点。而式(5)可以保证每轮选择的平均簇头数目为最优, 从而使网络在每轮成簇过程中, 能耗尽可能达到最小。

证明

$$\sum_{i=1}^N p(i) = \sum_{i=1}^N p_{opt} (1 + \beta_i) = p_{opt} \sum_{i=1}^N \left(1 + \frac{(E_i(r) - \overline{E}(r))}{\overline{E}(r)} \right) \quad (9)$$

将式(5)(7)代入式(9)求解可得: $\sum_{i=1}^N p_i = p_{opt} N = k_{opt}$ 。因此, 计算节点 s_i 在第 r 轮中当选簇头的概率阈值为

$$T(s_i) = \frac{p(i)}{1 - p(i)(r \bmod (1/p(i)))} = \frac{p_{opt}(1 + \beta_i)}{1 - p_{opt}(1 + \beta_i)(r \bmod (1/p_{opt}(1 + \beta_i)))} \quad (10)$$

根据式(10), 能耗偏差越大的节点当选为簇头的概率越大。那么, 式(9)(10)在保证网络每轮选举簇头的平均数目为最优的前提下, 同时确保了网络的运行过程是在向着均衡网络节点能量的方向发展, 避免了随着网络的运行个别节点能量消耗过度, 从而达到了均衡网络能量消耗的目的。

1.3.2 簇头轮换

由上节分析可知,每轮网络的总能耗可分为维护网络成簇的额外能耗 E_{overhead} 和用于有用数据传输的有效能耗 E_{every} 。那么定义网络的能量效率为 η ,有

$$\eta = \frac{E_e}{E_{\text{total}}} = \frac{E_e}{(E_e + E_a)} \quad (11)$$

其中: E_e 为整个网络生存时间内用在有效数据传输上的总能耗, E_a 为总额外能耗。由式(11)可知,要增大能量利用率就要尽可能地使 E_a 减少。因此, CDEC 算法在下轮簇头选择之前先计算当前簇头 s_i 的能耗偏差度 β_i' , 并且与本轮中簇头的能耗偏差度 β_i 进行比较。若 $\beta_i' < \lambda \beta_i$ ($\lambda > 0$) (其中 λ 为能耗偏差协调参数), 则进入簇头重选阶段; 否则, 在下轮中跳过成簇阶段, 直接由上轮的成簇结构进行数据采集和传输, 从而达到减少在网络中维护成簇的额外能耗, 提高网络能量的利用率。证明过程如下: 在 CDEC 算法的簇头选择中, 为使网络能耗均衡, 簇头选择的概率门限值 $T(s_i)$ 由节点能耗偏差度 β_i 决定。那么, 若节点 s_i 在当选了一次簇头之后 β_i 仍然很大, 则在接下来几轮簇头选择中它仍然成为簇头的概率也很大。因此, 引入的能耗偏差协调参数 λ 让能量比较多的节点有机会连续充当簇头, 节约了重新成簇过程中的额外能耗。若每轮稳定数据传输之后都再重新选择簇头而重新成簇, 显然会增加网络的额外能耗。因此, 合理地选择 λ 值是关键, 若 λ 太小, 簇头轮换频率较低, 导致部分节点耗能过度, 使能量消耗不均衡, 缩短了网络生存时间; 若 λ 太大, 簇头轮换太频繁, 将导致额外总能耗 E_a 较高, 使得能量效率 η 较小。 λ 对网络寿命的影响将会在仿真实验部分给予验证。

2 CDEC 算法的仿真与分析

为了验证 CDEC 算法的整体性能、有效性和实用性, 本章从网络的生存期和 network 吞吐量两个方面评价 CDEC 算法, 并同 DEEC 算法和 LEACH 算法进行比较。假设传感器节点 N 为 100, 随机分布分布在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的检测区域, 并设汇聚节点在监测区域的正中间。实验中的其他参数如表 1 所示。

本文将网络中第一个节点死亡之前的轮次叫做网络的稳定时间, 将最后一个节点死亡的轮次作为整个传感器网络的寿命。在进行性能对比之前, 首先考察一下参数 λ 对网络寿命的影响。参数 λ 可以调节簇头轮换的频率, 影响网络能量开销。

从图 1 数据可知, λ 在小于 0.75 时网络的稳定时间随着 λ 的增大而迅速增大; 当 λ 增到 0.75 ~ 0.85 之间时, 网络的稳定时间达到峰值; 随着 λ 值的继续增大, 网络稳定时间略有减少后基本稳定在 1300 轮左右。出现这种现象的原因是: λ 较小时簇头轮换频率较低, 导致个别节点的能量消耗过度而过早死亡, 网络稳定时间较短。而在 λ 的值大于 1 后, 网络每轮结束后都需要簇头轮换, 此时的能耗偏差协调参数已经失去了协调能力, 因此网络稳定时间趋于稳定。由于网络稳定时间的峰值出现在 0.75 ~ 0.85 之间, 在本实验中 λ 值取为 0.8。

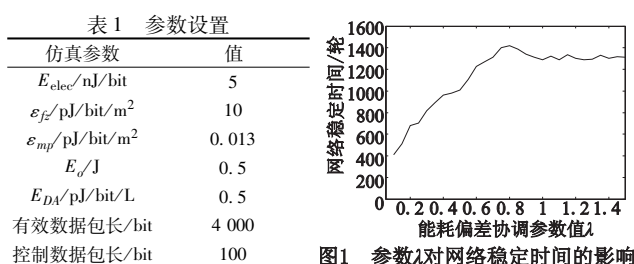


图1 参数 λ 对网络稳定时间的影响

其次, 对 CDEC、DEEC 和 LEACH 三种算法进行仿真, 从网络的生存期和网络的吞吐量两个方面进行对比。仿真结果如图 2、3 所示。

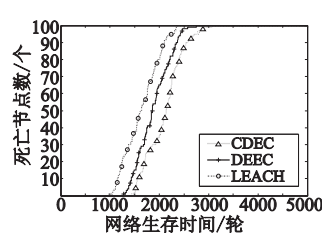


图2 网络寿命对比

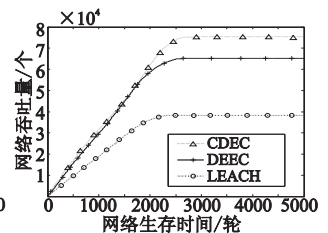


图3 网络吞吐量对比

网络的生存期仿真结果如图 2 所示。LEACH 算法下网络的稳定时期很短, 出现第一个死亡节点是在 1 000 轮附近, 此后整个网络节点死亡率较稳定, 到 2 500 轮基本上所有节点全部死亡, 这是由于 LEACH 算法在簇头选择时没有考虑节点初始能量不同及随网络运行节点能量有很大差异。DEEC 算法在簇头选择中加入了初始能量对当选簇头概率门限值的影响, 使网络的稳定时期延长到了 1 299 轮, 这表明 DEEC 算法比 LEACH 算法能更有效利用网络中的能量。然而, 由于初始能量级别高的节点在网络运行一段时间后, 其能量级别状态有很大变化, 造成 DEEC 算法不能随着网络的运行, 调整节点当选簇头的概率门限值, 因此其网络均衡性便很难得到保证。在 CDEC 算法下, 网络的稳定周期达到了 1 452 轮, 比 LEACH 的稳定时间提高了 30%, 比 DEEC 提高了近 13%。这是由于 CDEC 算法引入节点能耗偏差度 β 来调节簇头的选择, 使在网络运行中, 簇头的选举始终是以协调网络能耗均衡的前提下进行的, 所以无论节点能量如何变化, CDEC 算法都能动态地保证网络能耗的均衡性; 同时通过能耗偏差调节参数 λ , 有效调节了簇头轮换频率, 减少了维护成簇的额外能耗。

网络吞吐量实验结果如图 3 所示, DEEC 算法下的网络吞吐量比 LEACH 算法有了很大的提高, 而在 CDEC 算法中网络的吞吐量又得到了进一步的提高。由于, DEEC 比 LEACH 算法更能保证网络能量的均衡消耗, 因此在延长网络寿命的同时增加了网络的吞吐率。而 CDEC 算法下网络吞吐量的提高, 不仅是因为网络能量的均衡利用获得的, 还由于算法中引入了能耗偏差协调参数 λ , 通过对簇头轮换频率的调节, 减少了网络中的额外能耗, 提高了网络能量的利用率, 也即增加了网络的吞吐量, 进一步证明了 CDEC 算法的高效性。

3 结束语

本文通过分析 LEACH 和 DEEC 算法的特点和不足, 提出了异构 WSN 中一种能耗偏差协调的 CDEC 分簇算法。CDEC 算法通过节点能耗偏差 β 协调网络中节点能量分布的不均衡性, 使网络中的节点独立动态地决定其当选簇头的平均概率, 有效避免了 DEEC 算法不能随着网络运行均衡网络能耗的缺点, 在全局上保证了网络能耗均衡。此外, 用能耗偏差协调参数调节簇头轮换的频率, 减少了维护成簇过程中的开销, 延长了网络寿命。通过实验仿真表明, CDEC 算法较 LEACH 和 DEEC 算法, 有效延长了网络寿命并提高了网络吞吐量。

(下转第 4679 页)

群数量在8时,粒子已经基本找到了全局最优。可见种群数量的变化会对传感节点的布局产生一定的影响。虽然粒子数的增加会有利于网络覆盖率的提高,但是种群数量的增加会使计算时间以指数倍增加,大大降低了计算速度。因此在使用粒子群算法时,粒子群数量的选取要合适。由仿真结果可知,粒子种群数量为8时,节点的分布相对比较合理,而且计算量适中。

3.4 区域离散化程度对优化结果的影响

覆盖区域的离散化程度对覆盖率有一定的影响,离散化程度越高覆盖率也会越精确,但是随着区域离散化程度的增加,计算量会以指数倍增加。在保证覆盖精度的前提下,找到一个比较适中的离散化程度,在不同的覆盖重数下,对不同的离散化程度进行仿真,如图6所示。

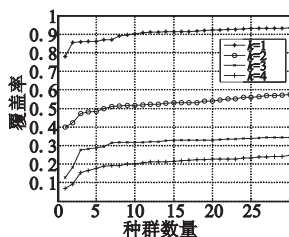


图5 种群数量与覆盖率关系

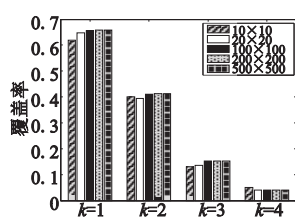


图6 离散化程度与覆盖率的关系

由图6可知,在离散化程度为 100×100 时,网络覆盖比较精确,小于这个离散化程度时,覆盖率不够稳定,大于时覆盖率趋于平稳。在考虑计算成本的前提下,根据仿真结果选择 100×100 的离散化程度比较适中。

4 结束语

本文提出一种基于粒子群算法的无线传感器网络 k 重覆盖优化策略,并且就各个参数对优化结果的影响进行了仿真分析。根据仿真结果选择比较合适的参数,这样在保证覆盖精度的前提下最大限度地节省了计算量。

参考文献:

- [1] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [2] 王良民,廖闻剑. 无线传感器网络可生存理论与技术研究[M]. 北京:人民邮电出版社,2011.
- [3] 任彦,张思东,张宏科. 无线传感器网络中覆盖控制理论与算法[J]. 软件学报,2006,17(3): 422-433.
- [4] RAINA M, KUMAR S, PANTRO R P. Node coverage algorithms in wireless sensor networks using mobile agents[J]. Acta Automatica Sinica, 2006, 32(6): 915-921.
- [5] LIU B, BRASS P, DOUSSE O, et al. Mobility improves coverage of sensor networks[C]//Proc of the 6th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. New York: ACM Press, 2005: 300-308.
- [6] 冯智博,黄宏光,李奕. 基于改进粒子群算法的WSN覆盖优化策略[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(4): 1272-1275.
- [7] 朱海荣,李平,程剑. 基于改进PSO算法的WSN覆盖优化方法[J]. 计算机工程, 2011, 37(8): 82-84.
- [8] 张国有,曾建潮. 基于黄蜂群算法的群机器人全区域覆盖算法[J]. 模式识别与人工智能, 2011, 24(3): 431-437.
- [9] KENNEDY J, EBERHART R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm[C]//Proc of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 1977: 4104-4108.
- [10] KENNEDY J, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[C]//Proc of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science. Washington DC: IEEE Computer Society, 1995: 39-43.
- [11] EBERHART R C, SHI Y. Comparison between genetic algorithm and particle swarm optimization[C]//Lecture Notes in Computer Science (Evolutionary Programming V II). London: Springer-Verlag, 1988: 611-616.
- [12] 刘丽萍,李桂丹,王智,等. 无线传感器网络多重覆盖算法[J]. 天津大学学报, 2009, 42(4): 310-314.
- [13] 刘明,曹建农,郑源,等. 无线传感器网络多重覆盖问题分析[J]. 软件学报, 2007, 18(1): 127-136.

(上接第4676页)

参考文献:

- [1] SUN Zhong-gao, ZHENG Zi-wei, CHEN Shao-hua, et al. An energy-effective clustering algorithm for multilevel energy heterogeneous wireless sensor networks[C]//Proc of International Conference on Advanced Computer Control. 2010: 168-172.
- [2] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. An application specific protocol architecture for wireless micro sensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communication, 2002, 1(4): 660-670.
- [3] MOLLANEYAD A, KHANLI L, ZEYNALI M, et al. EHRP: novel energy-aware hierarchical routing protocol in wireless sensor network[C]//Proc of International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops. 2010: 970-975.
- [4] YOUNIS O, FAHMY S. HEED: a hybrid, energy-efficient distributed clustering approach for Ad-hoc sensor networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366-379.
- [5] HEINZELMAN W. Application-specific protocol architectures for wireless sensor networks[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [6] SMARAGDAKIS G, MATTA I, BESTAVROS A. SEP: a stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks[C]//Proc of the 2nd International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications. 2004: 203-216.
- [7] LI Qing, ZHU Qing-xin, WANG Ming-wen. Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2006, 29(12): 2230-2237.
- [8] GAMWARIGE S, KULASEKERE C. A cluster based energy balancing strategy to improve wireless sensor network lifetime[C]//Proc of International Conference on Industrial and Information Systems. 2007: 403-408.
- [9] ELBHIRI B, SAADANE R, FKIHI S, et al. Developed distributed energy-efficient clustering (DDEEC) for heterogeneous wireless sensor networks[C]//Proc of International Symposium on Visual Computing. 2010: 1-4.
- [10] ZYTOUNE O, FAKHRI Y, ABOUTAJDINE D. Time based clustering technique for routing in wireless sensor networks[C]//Proc of International Conference on Multimedia Computing and Systems. 2011: 1-4.