

基于最小生成树的非均匀分簇路由算法

张明才*, 薛安荣, 王伟

(江苏大学 计算机科学与通信工程学院, 江苏 镇江 212013)

(* 通信作者电子邮箱 zzhmc86@163.com)

摘要:发现现有的针对非均匀分簇路由算法没有充分考虑簇首与基站之间最优路径选择,而导致传输路径上的能量消耗不均衡的问题。为了更好地均衡传输路径上节点能量的消耗,提出了基于最小生成树的非均匀分簇的路由算法。该算法利用节点剩余能量和节点到基站的距离选举簇首,然后通过建立最小生成树搜寻最优传输路径,这样可以减少传输路径上的能量消耗,有效地解决能耗不均衡问题。理论分析和实验结果均表明,该算法无论在存活节点个数还是在能量消耗上都明显优于 EEUC 算法和 EBCA。

关键词:簇首;非均匀分簇;不均衡;剩余能量;最小生成树

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Uneven clustering routing algorithm based on minimum spanning tree

ZHANG Ming-cai*, XUE An-rong, WANG Wei

(School of Computer Science and Telecommunication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

Abstract: The existing uneven clustering routing algorithms do not consider the optimal path selection between cluster heads and base station, which leads to unbalanced energy consumption. In order to balance energy consumption of transmission paths, this paper proposed an uneven clustering routing algorithm based on minimum spanning tree. The algorithm utilized residual energy of nodes and the distance between nodes and base station to select cluster heads, and then generated minimum spanning tree to search the optimal transmission paths, which reduced energy consumption on the transmission paths and effectively solved unbalanced energy consumption. The theoretical analysis and experimental results show that the algorithm is better than the existing Energy Efficient Uneven Clustering (EEUC) and Energy Balancing Clustering Algorithm (EBCA) in terms of the number of live nodes and energy consumption.

Key words: cluster head; uneven clustering; unbalanced; residual energy; minimum spanning tree

0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)作为新兴的网络测控技术,能够自主进行数据采集、融合和传输。由于节点与基站的距离较近,节点之间一般都采用多跳的形式进行数据传输。在这种“多对一”的数据传输模式中,导致靠近基站的节点会因转发过多的能量而死亡,出现能量消耗不均衡现象。因此,如何均衡各个节点之间能量消耗是 WSN 研究的热点。

为了减少冗余数据开销,Heinzelman 等^[1]提出了自适应的分簇路由算法,方便了节点管理和控制信道的接入,减少开销,提高资源的利用效率,有效地降低节点能量消耗,延长网络的生命周期,但在分簇传感器网络中,由于簇首到基站的距离比较远,簇首与基站之间需要通过多跳路由的方式进行传输和转发数据,这样进行数据传输时,将会造成离基站近的簇首因过多地转发数据而消耗大量的能量,导致能量消耗的不均衡问题;文献[2]提出了一种能量有效的非均匀分簇(Energy Efficient Uneven Clustering, EEUC)算法,虽然同时考虑簇内和簇间的能量均衡问题,但是 EEUC 需要周期性地随机竞选簇首,而且竞选簇首时只考虑了节点的剩余能量;文献[3]提供了一种有效的部署模式,将部署问题转化为多背包

问题,利用蚁群优化的方法解决这一问题,能够延长网络的生命周期,但是对于一些环境恶劣的地区很难实现人工部署;在文献[4]提出了一种负载均衡的无线传感器网络自适应分簇算法,该算法使用簇半径、节点剩余能量和簇首间距作为参数选取簇首,簇首与基站节点采用多跳的方式进行通信;文献[5]提出的改进的非均匀分簇算法考虑邻居节点剩余能量,文献[6]算法根据剩余能量选举簇首,同时限制簇内成员的数量和多跳路由的方式控制能量的消耗,都不能有效均衡节点的能量;文献[7]通过分析无线传感器网络中数据传输的动态连接优化问题,提出了一种利用代价模型、自适应学习和自协调启发式方法进行实时变量值的筛选方法,主要是集中于簇内连接计算,然后对成对主成分进行优化,实验结果表明可以应用于大规模的标准数据集上;文献[8]提出的一种能量均衡的路由算法(Energy Balancing Clustering Algorithm, EBCA),在非均匀部署的情况下,利用平衡网络设置节点的能量阈值来选取簇首,虽然在一定程度上能有效地降低网络的能量消耗,均衡网络中节点的能耗,但是没有涉及到最优路径的选择问题;文献[9]提出了一种能量高效非均匀分簇算法(Uneven Clustering Algorithm, UCA),通过簇首之间协调传输数据减少基站附近簇首的负担,但是没有涉及到最优路径的选择问题;文献[10]提出自适应分布式再分簇算法,通过节

收稿日期:2011-08-17;修回日期:2011-12-09。 基金项目:高校博士点基金资助项目(20093227110005);省科技型企业创新资金资助项目(BC2010172);校高级人才启动基金资助项目(09JDC041)。

作者简介:张明才(1986-),男,山东临沂人,硕士研究生,CCF 会员,主要研究方向:数据挖掘、无线传感器网络;薛安荣(1964-),男,江苏镇江人,教授,博士,CCF 高级会员,主要研究方向:数据库、数据挖掘;王伟(1986-),男,山东滨州人,硕士研究生,CCF 会员,主要研究方向:恐怖事件与行为预测。

点的剩余能量和每个簇的平均能量来选择簇首和下一跳,但未考虑节点到基站的距离;文献[11]针对无线传感器网络节点负载不平衡性,在综合考虑节点信息感知和信息传递能耗基础上对圆形区域节点能耗进行分析,使网络结束后,节点的剩余能量基本相同,仅仅考虑圆形区域,不具普遍性;文献[12]通过分析网络中不同半径下能量消耗情况,提出了不等簇半径轮转工作的能量空洞避免策略,对簇首之间的传输问题未进一步优化;文献[13]采用基于优先级的簇首选择策略,避免能量低的节点成为簇首,在一定程度上可以有效缓解能量洞问题;文献[14]针对基站附近的节点由于要转发数据而消耗过多的能量,导致能量洞的形成,提出了剩余能量启发合作传输避免能量空洞,通过合作阈值来进行数据传输,但是没有考虑到节点到基站的传输路径。

为此,本文提出了基于最小生成树的非均匀分簇路由算法(Uneven Clustering Routing Algorithm based on Minimum Spanning Tree, UCRAMST),很好地解决了能量消耗不均匀的问题,有效延长整个网络的生命周期。

1 模型与问题描述

1.1 前提假设

传感器网络性质如下:基站节点具有较强的计算和存储能力,且满足对能量的需要;所有的传感器节点一旦部署之后是固定不动的,具有相同的通信能力和初始能量,另外还具备一定的数据融合功能;所有的节点根据接收的信号强度指示(Received Signal Strength Indication, RSSI)可以获知自己的位置信息,根据接收者的距离远近,自动地调节其发送功率,以减少节点能量的消耗。

1.2 能量模型

在描述算法之前,分析传感器网络的发送能量消耗,采用文献[15]中定义的能量模型:

$$E_{\text{Trans}}(s_i, s_{i+1}) = e_0 + \varepsilon(d(s_i, s_{i+1}))^\alpha \quad (1)$$

其中: e_0 为发射电路的耗损能量, ε 表示模型中功率放大所需的能量, $d(s_i, s_{i+1})$ 表示两个节点之间的距离, $E_{\text{Trans}}(s_i, s_{i+1})$ 表示节点 s_i 将单位数据传输给 s_{i+1} 所消耗的传输能量, α 取2或4。

传感器节点接收 k 比特数据消耗的能量 $E_{\text{rece}}(k)$ 为:

$$E_{\text{rece}}(k) = k * e_0 \quad (2)$$

假设 s_i 选择 s_j 作为其数据转发节点,其中每个节点在固定的时间 T 内产生 k 比特的数据, s_i 所在的簇内节点的个数为 N_i , s_j 所在的簇内节点的个数为 N_j 。为了简化问题分析,假设通信采用自由空间模型,并假设 s_i 将数据传输至 s_j , s_j 将数据直接传输至基站,则传输 k 比特的数据至基站, s_i 消耗的能量 E_i 为

$$E_i = N_i * ke_0 + N_i * kE_{\text{Trans}}(s_i, s_j) = N_i * k(2e_0 + \varepsilon d^2(s_i, s_j)) \quad (3)$$

s_j 消耗的能量主要有3部分: s_j 所在的簇内节点收集数据消耗的能量为 $N_j * ke_0$,接收 s_i 的传输数据所消耗的能量为 $N_i * ke_0$,发送 s_i 和 s_j 这两部分数据消耗的能量。则 s_j 消耗的能量 E_j 为:

$$E_j = N_j * ke_0 + N_i * ke_0 + (N_i + N_j) * kE_{\text{Trans}}(s_j, Bs) = (N_i + N_j) * k(2e_0 + \varepsilon d^2(s_j, Bs)) \quad (4)$$

则 $s_i \rightarrow s_j \rightarrow$ 基站这条路径上消耗的能量 E_{com} 为:

$$E_{\text{com}} = E_i + E_j = (4N_i + 2N_j)ke_0 + N_i k \varepsilon d^2(s_i, s_j) + (N_i + N_j)k \varepsilon d^2(s_j, Bs) \quad (5)$$

由式(5)可知, $d^2(s_i, s_j) + d^2(s_j, Bs)$ 将决定网络能量消

耗的高低,因此优化传输路径可以降低网络中能量的消耗。

2 基于最小生成树的非均匀分簇路由算法

UCRAMST分3部分:根据节点的剩余能量和节点到基站的距离进行非均匀分簇和簇首的选择;对簇首之间的传输路径进行搜索,通过建立最小生成树来寻找最优的传输路径;进行数据传输和转发并根据剩余能量和距离进行簇内调整和路由更新。

2.1 非均匀分簇和簇首选举

无线传感器网络所有的节点参与簇首的竞选,簇首选举采用非均匀分布竞选方式,网络中的所有节点都参与竞选,并将节点的剩余能量和节点到基站的距离作为簇首选择的评价标准,每进行一段时间的数据传输之后,簇内节点把自己的能量信息发送给簇首,在簇内所有节点中选取一个剩余能量最大的且离基站较近的节点取代簇首。通过簇首轮转的方式可以有效地均衡簇内各节点的能量消耗。

规则1 在竞选过程中,如果节点 s_k 竞选成功,则在 s_k 的竞选半径 R_k 之内的所有的节点均不能成为簇首并且退出竞选的过程。选举时计算竞选广播半径方法如下:

$$R_k = \left[1 - c \frac{d_{\text{max}} - d(s_k, Bs)}{d_{\text{max}} - d_{\text{min}}} \right] R_0; c \in (0, 1) \quad (6)$$

其中: R_0 是根据节点到基站的距离信息计算出来的竞选半径的最大值, R_k 是节点 s_k 的竞选半径, d_{max} 和 d_{min} 分别是节点到基站距离的最大值和最小值, c 是用于控制竞选半径取值范围的参数, $d(s_k, Bs)$ 表示节点 s_k 到基站的距离。由式(6)可知,随着节点到基站距离的减小,其竞选半径随之也减小,即靠近基站的传感器节点的竞选半径较小。

选举非均匀簇首的算法步骤:

第1步 各节点计算自己的竞选半径并在竞选半径 $R_k/2$ 范围内广播竞选的消息MSG1,该消息包含节点的ID、节点到基站距离 $d(s_k, Bs)$ 和剩余能量 E_{Resi} 。

第2步 各节点收到其他节点的竞选消息MSG1,把满足条件的节点添加到竞选节点的列表Table中。条件: $d(s_k, s_j) < R_k$ 或者 $d(s_k, s_j) < R_j$,其中 $d(s_k, s_j)$ 表示节点 s_k 与节点 s_j 之间的距离, R_k 表示节点 s_k 的竞选半径。

第3步 各节点根据建立的竞选列表中的节点信息竞选簇首。如果节点 s_k 的剩余能量

$$E_{\text{Resi}}^k = \max(E_j), s_j \in \text{Table}(s_k)$$

且式(7)~(8)满足时, s_k 就宣告自己成为簇首。

$$E(s_k, s_j) + E(s_j, Bs) < E(s_k, Bs) \quad (7)$$

$$d(s_k, s_j) < R_k \quad (8)$$

第4步 若节点 s_k 收到 $\text{Table}(s_k)$ 中的其他节点的簇首宣告成功的消息, s_k 广播竞选失败的消息MSG2,然后退出簇首的竞选并从 $\text{Table}(s_k)$ 中删除。

第5步 若节点 s_k 收到 $\text{Table}(s_k)$ 中的其他节点竞选失败的消息MSG2, s_k 就把这个节点从 $\text{Table}(s_k)$ 中删除。

第6步 若在选举结束后, s_k 没有成为簇首,根据接收到的簇首信息决定加入哪个簇,RSSI值越大表明这个节点和发出此信息的簇首的距离越近,从而加入该簇可以节省能量, s_k 就加入到 $\text{Table}(s_k)$ 中距离最近的簇首所在的簇中。

第7步 分簇完成后,各个簇首在自己的竞选半径 R_k 范围内广播簇首消息MSG3,并收集其他簇首广播的消息,作为路由表的相关信息。

2.2 最优路径选择算法

分簇完成和簇首选举结束后,首先把每个簇抽象成一个

点,把相邻的簇用边连接起来,构造一个有向连通图,用带权连通图 $G = G(V, E)$ 表示无线传感器网络,其中 V 是簇首和基站的集合, E 是边集。根据信号强度 RSSI 估计各节点到基站的距离,对簇进行分级并编号 $1, 2, \dots, N$, 距离基站近的簇的编号较小,距离基站远的簇编号较大。根据编号的大小,不断地寻找各个簇首到基站的最优传输路径,建立一个能耗最小的生成树,因为在能量空洞问题中,距离基站近的节点比距离基站远的节点消耗更多的能量,因此优先考虑内环的转发关系,建立较好的树型结构,使外围簇首在选择传输距离时要适合内层传输距离的分配。

最优路径选择的算法步骤:

第1步 根据接收广播信息的信号强度 RSSI,各簇首节点计算自己到基站的距离 d_i ,根据 d_i 对簇进行分级,各簇首的等级编号的计算如下:

$$C_i = \left\lceil \frac{d_i}{d_0} \right\rceil$$

第2步 从基站开始搜索处于第一等级 C_1 的簇首,把这些簇首添加到树型结构中作为最小生成树的初始化的一部分,这一部分的簇首可以将汇聚的数据直接传给基站。

第3步 从 C_2 等级的簇首开始向外层的簇首进行逐级的搜索,将搜索的簇首不断地加入到树型结构中,然后对树型结构中的簇首节点的所有连接方式进行遍历,选择代价最小的路径组成新的树型结构。

第4步 若新组成的树型结构的数量大于搜索中允许被创建的数量最大值 C_{\max} 时,就不再向该树型结构中添加新簇首节点。

第5步 最后检查所有的簇首是否都被添加到树型结构中,若是,就完成最小生成树的搜索过程,当前树型结构中的状态就是所要建立的最小生成树;否则转向第3步,继续搜索。

因为随着簇首节点的数量增加,路径搜索的计算量会逐渐地增大,不仅浪费簇首节点的能量消耗,而且增加了搜索的时间复杂度。因此,引入阈值 C_{\max} 减小搜索的时间复杂度,其中 C_{\max} 是等级划分的最大值。

2.3 数据传输和路由更新

数据传输分簇内传输和簇间传输两部分,簇内传输由簇内成员按时分多路接入 (Time Division Multiple Access, TDMA) 方式把数据传输给簇首,在簇间传输过程中,簇首根据最小生成树中的路径传输到下一跳簇首,直至基站。

以节点 s_k 为例, s_k 节点的剩余能量与节点到基站的距离的比值计算如下:

$$P_k = E_{\text{Resi}}^k / d(s_k, Bs) \quad (9)$$

在进行一段时间的数据传输后,簇内每个节点 s_k 将剩余能量信息 E_{Resi}^k 发给簇首节点 s_h , s_h 计算 E_{Resi}^k 和 $d(s_k, Bs)$ 的比值,选择比值最大的节点 s_j ,若满足 $P_k > P_j$,则节点 s_k 就成为新的簇首;否则 s_j 就成为新的簇首,并将这一信息广播给簇内各个节点和相邻的簇首,同时修改路由表信息,包括 ID、相关的能耗信息和剩余能量。

簇内调整后,将更改后的簇首信息添加到路由表中,如果路由表中有原簇首的信息,则将其删除掉,并将新簇首的 ID、剩余能量和相关的能耗信息添加到路由表中,并将这一信息广播,使传感器网络中的所有簇首都能获得这一信息,更改其他簇首节点中存在的原簇首的信息。

2.4 算法性能分析

假设无线传感器网络中节点数量为 N ,簇首的数量为

N_{head} 。下面讨论基于最小生成树的非均匀分簇动态路由算法的时间复杂度。

对于非均匀簇和簇首选择部分,首先要对所有的传感器节点计算竞选簇首的广播半径,时间复杂度为 $O(N)$;每个传感器节点在添加到竞选列表时都要计算各节点之间的距离,对应的时间复杂度 $O(N^2)$;根据每个节点的竞选列表,通过比较剩余能量和节点与基站的距离来决定簇首的选择,对应的时间复杂度是 $O(N^2)$;从整体上看,整个非均匀分簇和簇首选举算法的时间复杂度是 $O(N + N^2 + N^2)$,即 $O(N^2)$ 。对于基于最小生成树的方法搜索最优路径的部分,首先构造一个带权连通图,构造带权的连通图的时间复杂度是 $O(N_{\text{head}}^2)$;根据 RSSI 距离对簇首进行等级划分的复杂度是 $O(N_{\text{head}})$;当搜索簇首节点到基站最优路径时,从基站出发依次向外寻找代价最小的路径,所以搜索最优路径的时间复杂度是 $O(N_{\text{head}})$ 。故进行搜索最小生成树的时间复杂度是 $O(N_{\text{head}}^2 + N_{\text{head}} + N_{\text{head}})$,即 $O(N_{\text{head}}^2)$ 。关于通信代价主要有两部分:发送和接收的能耗,主要是与发送参数 ε 和传送的距离 d 有关。

综上所述,由于 $N \gg N_{\text{head}}$,所以 UCRAMST 的时间复杂度是 $O(N^2)$ 。

3 实验结果及分析

在 OPNET 仿真软件中对 UCRAMST 进行仿真验证,并与算法 EEUC 和 EBCA 进行比较,仿真环境和具体的参数如下:

仿真的环境是在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的正方形区域内随机地分布 150 个传感器节点,初始的能量为 $E_{\text{ini}} = 0.5 \text{ J}$,基站处于正方形的中心(两条对角线的交点),采用文献[15]中的能量模型 $\varepsilon = 10 \text{ pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^2)$,数据包为 4 Kb,数据采集的频率为 2 帧/秒,传输速率是 256 Kbps, $e_0 = 50 \text{ nJ}/\text{bit}$, $R_0 = 30 \text{ m}$, $N = 150$, $N_{\text{head}} = 18$, $d_{\max} = 70 \text{ m}$, $d_{\min} = 5 \text{ m}$, $d_0 = 50 \text{ m}$ 。

UCRAMST、EEUC 算法和 EBCA 进行比较,EEUC 算法通过一定范围内选取剩余能量最高的节点作为簇首,并且严格控制簇首的数量,簇间采用多跳路由的方式传输和转发数据,所消耗的能量比较多,节点的死亡也就比较快。而 EBCA 在非均匀部署的情况下,通过平衡网格来选取簇首,并且严格控制簇首的数量,簇间采用多跳路由的方式传输和转发数据,所以消耗的能量会显著减少,节点的死亡也不会像 EEUC 算法那么快,在一定程度上延长了整个网络的生命周期。而本文算法在选举簇首时不仅考虑节点的剩余能量,还考虑节点到基站的距离,根据剩余能量和距离更换簇首;在传输和转发数据阶段,采用多跳路由的方法而且通过产生最小生成树的形式寻求最优路由,能量消耗比其他算法要慢很多,能有效地延长整个网络的生命周期。

在无线传感器网络通信中,所有传感器节点部署后静止不动,具有相同的初始能量且不可更换,一旦能量消耗殆尽,则传感器节点就死亡。因此,网络中存活节点数是体现网络中能量消耗的重要指标之一,降低传感器节点和网络能量消耗,延长网络生命周期是设计网络首要考虑的重要因素之一。

图 1 表示网络中存活节点的数量随着网络生命时间的变化情况。由图 1 可知,EEUC 算法和 EBCA 分别在 $6 \times 10^4 \text{ s}$ 和 $1.6 \times 10^5 \text{ s}$ 时开始出现第一个死亡节点,而本文算法将第一个死亡节点推迟到 $2.75 \times 10^5 \text{ s}$ 左右,这是因为本文算法不仅采用剩余能量与到基站的距离比值选举簇首减少单个簇首的能量消耗,而且通过建立最小生成树的形式寻找簇首到基站的最优路径,减少了路径上传输能量的消耗,有效地延长网络的生命周期。从图 1 可看出:随着时间的增加存活节点的数

量越来越少,网络的质量也有所下降,但是与 EEUC 和 EBCA 相比,UCRAMST 存活节点数量减小的速度相对较慢,能够有效地延长网络的生命周期。

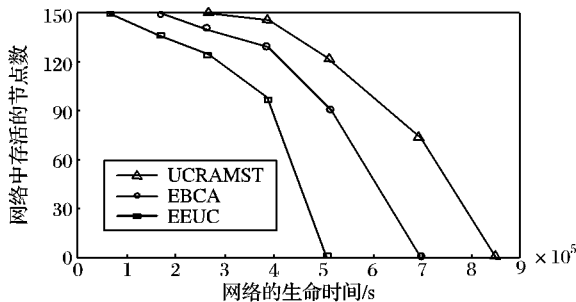


图 1 3 种算法在网络中节点存活数量

图 2 表示整个网络能量消耗情况,本文算法在非均匀分簇算法的基础上,构造大小非均匀的簇,生成的簇的数目比较稳定且可靠性好,能较好地均衡簇首的能量消耗,通过建立最小生成树寻找簇首到基站间的最优路径,能够减少簇间传输路径上能量的消耗,能够较好地延长网络的寿命。从图 2 可看出:在相同时间的情况下,UCRAMST 能量消耗最低,而且整个网络的生命周期最长,达到了预期的实验效果。

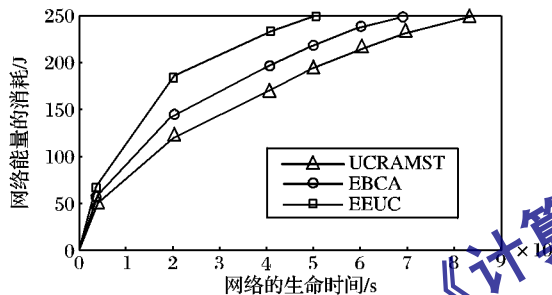


图 2 3 种算法能量消耗情况

4 结语

本文针对簇首之间能量消耗不均衡问题,提出了基于最小生成树的非均匀分簇路由算法。通过建立最小生成树的方式进行数据的传输和转发,能够很好地均衡网络中各节点的能量消耗,实验结果表明,本文算法能节省整个网络的能量,有效地延长了整个网络的生命周期。

参考文献:

[1] HENZELMAN W, CHANDRAKSN A, BALAKRISHNAN H. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]// Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference

on System Sciences. Washington, DC, IEEE Computer Society, 2000: 3005 - 3014.

- [2] 李成法,陈贵海. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机学报, 2007, 30(1): 27 - 36.
- [3] LIAO WEN-HWA, KAO YUCHENG, WU RU-TING. Ant colony optimization based sensor deployment protocol for wireless sensor networks [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(6): 6599 - 6605.
- [4] 李志宇,史浩山. 一种负载均衡的无线传感器网络自适应分簇算法[J]. 西北工业大学学报, 2009, 27(6): 822 - 826.
- [5] HE YONGGANG, XU TINGRONG. An improved uneven clustering routing algorithm for sensor networks[C]// The International Symposium on Computer Networks and Multimedia Technology. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 1 - 5.
- [6] 彭铎,张秋余,贾科军. 能量高效的无线传感器网络分簇路由协议[J]. 计算机工程, 2009, 35(17): 123 - 125.
- [7] MIHAYLOV S R, JACOB M, LIVES Z G, et al. Dynamic join optimization in multi-hop wireless sensor networks [J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2010, 3(1/2): 1279 - 1290.
- [8] LI L Y, JIANG X L, ZHONG S H, et al. Energy balancing clustering algorithm for wireless sensor networks[C]// NSWCCT'09: International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 61 - 64.
- [9] YUAN HUIYONG, LIU YONGLI, YU JIANGPING. A new energy-efficient unequal clustering algorithm for wireless sensor networks [C]// IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering. [S.l.]: IEEE, 2011: 431 - 434.
- [10] BAJAJER F, AWAN I. Adaptive decentralized re-clustering protocol for wireless sensor networks [J]. Journal of Computer and System Sciences, 2011, 77(2): 282 - 292.
- [11] 李磊,刘海涛. 无线传感器网络节点非均匀分布方法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(11): 2180 - 2184.
- [12] 刘安丰,阳国军,陈志刚. 基于不等簇半径转换工作的传感器网络能量空洞避免研究[J]. 通信学报, 2010, 31(1): 1 - 8.
- [13] 陈志奎,倪晶晶,姜国海. 一种基于剩余能量级别的负载均衡路由协议[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(12): 82 - 86.
- [14] JUNG J W, INGRAM M A. Residual-energy-activated cooperative transmission to avoid the energy hole [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2010: 1 - 5.
- [15] HEINZELMAN W, CHANDRAKSN A. An application specific protocol architecture for wireless micro-sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2002, 1(4): 660 - 670.

(上接第 786 页)

[7] CHEN S, COOK T B, ANDERSON L C. A comparative study of two blind FIR equalizers [J]. Digital Signal Processing, 2004, 14(1): 18 - 36.

[8] 肖瑛,董玉华. 判决引导与常数模融合盲均衡算法研究[J]. 声学技术, 2008, 27(3): 446 - 449.

[9] 钟华,金国平,郑林华,等. 改进 MCMA 盲均衡算法[J]. 信号处理, 2009, 25(5): 766 - 770.

[10] 张艳萍,赵俊渭. 适用于高阶 QAM 信号的双模式盲均衡算法及仿真[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(1): 238 - 240.

[11] GUO Y C, ZHAO J W. A novel mixed constant modulus blind equalization algorithm [C]// ICSP'04: Proceedings of the 7th International Conference on Signal Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004: 319 - 322.

[12] ARENAS - GARCIA J, FIGUEIRAS - VIDAL A R. Improved blind

equalization via adaptive combination of constant modulus algorithms [C]// 2006 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006: 756 - 759.

- [13] ZHANG XING-WAN, RAO WAN. New concurrent blind equalization algorithm suitable for high-order QAM signals [C]// FSKD'08: Fifth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008: 177 - 181.
- [14] 饶伟,郭业才. 一种双模式盲均衡新算法[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(3): 126 - 129.
- [15] 张艳萍,赵俊渭,王尚斌,等. 基于判决引导的水声信道混合盲均衡算法研究[J]. 声学学报, 2005, 30(5): 442 - 446.
- [16] 杨琨. 关于恒模算法及其初始化的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2005.