

无线传感器网络非均匀等级分簇拓扑结构研究

李洪兵^{1,3} 熊庆宇² 石为人¹

(重庆大学自动化学院 重庆 400030)¹ (重庆大学软件学院 重庆 400030)²

(重庆三峡学院 重庆 404100)³

摘要 网络拓扑结构影响着传感器节点的负载均衡与生存周期,分簇结构是无线传感网络的一种有效地拓扑管理方式。根据血管网络特征以及对构建无线传感器网络拓扑结构的启示,提出了无线传感器网络非均匀等级分簇拓扑结构。分析血管网络结构特征,建立数学模型和网络拓扑结构,对具有压力差的网络节点进行等级标定。根据改进粒子群算法进行非等概率静态分簇,形成不同等级区域具有密度和规模不等的非均匀等级分簇拓扑结构。仿真分析表明,此算法能优化网络分簇,均衡节点能耗,延长网络生命期,避免网络能耗热点问题。

关键词 无线传感器网络,拓扑结构,等级分簇,非均匀,粒子群算法

中图分类号 TP393 文献标识码 A

Study on Topology with Non-uniform Hierarchical Clustering for Wireless Sensor Networks

LI Hong-bing^{1,3} XIONG Qing-yu² SHI Wei-ren¹

(School of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China)¹

(School of Software, Chongqing University, Chongqing 400030, China)²

(Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China)³

Abstract The topology of network affects the load balancing and service lifetime of the sensor nodes. Clustering is an effective pattern of topology management for wireless sensor networks. According to the distribution characteristics of the vascular paths and inspirations to topology for wireless sensor networks, a non-uniform hierarchical clustering algorithm was presented. First we studied the structural characteristics of the vascular network, then established the mathematical model and network topology. The nodes with different pressure values in wireless sensor networks are hierarchically marked and statically clustered with non-uniform probability based on the improved particle swarm optimization. So the non-uniform hierarchical clustering topology is established with different scale and quantity of clusters in different hierarchy area. Simulation shows that the algorithm can optimize the network clustering, balance the nodes' energy consumption. It also lengthens service lifetime and avoids the hot issue in the energy consumption of network.

Keywords Wireless sensor networks, Topology, Hierarchical clustering, Non-uniform, Particle swarm optimal

1 引言

能量受限是无线传感器网络的一个重要特征^[1]。拓扑结构影响着网络能耗均衡与生存周期。分簇层次结构减小了网络规模,降低了拓扑管理难度,具有优良的扩展性。基于分簇的网络拓扑结构在拓扑管理、负载均衡、数据融合与节点协同处理等方面都具有明显的优势^[2,3],是无线传感网络一种有效的拓扑管理方式。分簇拓扑结构主要研究确定簇头选取策略、负载均衡的簇结构、簇内节点和簇头节点间的工作模式,建立并优化层次性的网络拓扑结构,以降低网络开销,延长网络寿命^[2]。

分簇结构的簇头轮换策略主要包括周期性轮换与能量阈

值触发轮换方式^[3]。根据单位时间周期地进行网络簇头轮换与拓扑重建,以 LEACH^[4]、HEED^[5]、ACE^[6]算法为典型代表;或根据能量阈值动态触发簇头,以 EDAC^[7]、EDCR^[8]算法为代表;或根据整个网络能耗均衡进行分簇^[9]。大规模无线传感器网络的分簇拓扑结构不仅要考虑能耗均衡问题,还要兼顾其它性能指标。建立基于分簇拓扑结构的无线传感器网络应具有良好的性能。

近年来有学者将运用仿生学的智能方法引入到无线传感器网络分簇拓扑构建中,开展无线传感器网络安全检测与故障诊断的拓扑结构研究^[10-14],如生物免疫系统或神经免疫网络等。本文将人体血管网络特性引入到无线传感器网络拓扑结构和分簇模式研究中^[15],在前期提出的改进粒子群分簇算

到稿日期:2012-05-04 返修日期:2012-08-04 本文受国家科技重大专项(2009ZX07528-003-09),高等学校博士学科点专项科研基金(20100191110037),重庆市科技攻关项目(CSCT,2010AA2036, cstc2012gg-yyjs40008),重庆万州区科技计划项目([2010]23号,201203037),重庆三峡学院科技项目([2011]52号),重庆三峡学院青年项目(12QN14)资助。

李洪兵(1981-),男,博士生,主要研究方向为智能信息处理、无线传感器网络故障诊断等方面的理论与应用,E-mail: sxxylhb@163.com;熊庆宇男,教授,博士生导师,主要研究方向为智能感知与智能计算、普适计算与嵌入式系统等;石为人男,教授,博士生导师,主要研究方向为智能感知、控制与决策等。

法(IPSO)分簇^[16,17]的基础上,提出无线传感器网络非均匀等级分簇拓扑结构,以优化网络分簇,均衡节点能耗,实现负载均衡,避免网络能耗热点问题。

2 血管网络与数学模型

2.1 基本理论

血管网络为类分形树状分叉网络,结构错综复杂,具有分形特征^[18]。不同段的血管的结构、物理特性和功能有较大差异,具有不同的血液传输速率和传输量。血管具有相对稳定、局部弹性和空间连通等特性。两点间具有多条连通的路径。各点之间的血压不等,血液根据压力差值有向流动。血流量、流速、血管截面和血压参数间有着定量的关系。

血管血流特性对构建无线传感器网络分簇拓扑结构有着重要启示。所建立的拓扑结构应是层次性分簇结构,网络节点根据距离 Sink 节点远近被等级划分,不同等级节点采用不同概率分簇,具有不同的簇分布密度和规模。运用蚁群算法的信息素归一化值确定最优传输路径,实现网络路由多路径连通性。节点间具有压力差,以保证数据的有向传输。

2.2 数学模型

定义 1(等级度) 根据节点距离 Sink 节点远近,将网络节点划分为不同等级区域,每个等级的节点用相同的等级度进行标定,即

$$G_i = m \text{ if } \text{dist}(s, i) \in ((m-1) \cdot r, m \cdot r) \quad (1)$$

式中, G_i 表示节点 i 的等级度, m 为等级值, $\text{dist}(s, i)$ 为节点 i 到 Sink 节点的欧氏距离, r 为初始设定的距离值,与节点的射频传输距离 r' 和网络节点分布情况有关,一般有 $r' \in [r, 2r]$ 。

建立具有如下特征的数学模型:(1)压力差分网络,无线传感器网络中每个节点均有压力度 P' ,且每个节点之间的压力度不等,节点间具有差分压力 $\Delta P'$;(2)有向数据流,数据在具有差分压力的节点之间有向流动;(3)有向赋权图的连通性,网络为有向赋权图,相交的点之间的每一条边 e 都赋与不同的权值 $w(e)$,每条边都是有向的且任意两点是连通的;(4)分簇密集度,在距离 Sink 节点不同的区域上,簇头节点分布的数量和密度不等。距 Sink 节点近的区域上,簇头节点分布数量较多,分布密度较大;距 Sink 节点较远的区域上,簇头节点分布数量较少,分布密度较小,其数学表示如下:

$$P_i' > P_j', \text{ if } \text{dist}(i, s') < \text{dist}(j, s') \quad i, j \in (1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$\Delta P_{i,j}' = p_i' - p_j' \quad (3)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} w_{ij}, & (v_i, v_j) \in E \\ 0, & i = j \\ \infty, & (v_i, v_j) \notin E \end{cases} \quad (4)$$

$$\tilde{p}_i' = \sum \tilde{p}_l', l \text{ 为 } i \text{ 的邻居节点} \quad (5)$$

式中, P_i' 为节点 i 的压力值, $\Delta P_{i,j}'$ 为节点 i 与节点 j 的压力差, $\text{dist}(i, s')$ 为节点 i 到中心点 s' 的欧氏距离, n 为网络节点数。 \tilde{p}_i' 为 i 点压力, a_{ij} 为有向赋权图邻接矩阵元素, E 为节点集中有序的元素偶对组成的集合。

3 网络拓扑结构

定义 2(传输路径建立规则) 节点不与同级节点建立传输路径,只与邻级簇头节点建立传输路径,且与每个在其发射

功率覆盖范围的邻级节点都建立可能传输路径。可能传输路径中有一条被选择为实际的传输路径,其余为可选择的备份传输路径。其建立规则如表 1 所列。

表 1 非均匀等级拓扑建立规则

Suppose $G_k = G_{k+1} = \dots = G_{k+l} = m, i \neq i', i, i' \in (k, k+1, \dots, k+l)$;
$G_i = G_{i'} = m, i \not\leftrightarrow i'$;
If $G_j = \{m-1, m+1\}, j \in (k', k'+1, \dots, k'+l)$;
If $\text{Dist}(i, j) > \text{DistRF}$;
$i \not\leftrightarrow j$;
else
$i \leftrightarrow j$;
end
end

其中, $\text{Dist}(i, j)$ 表示节点 i 与节点 j 的欧氏距离, DistRF 表示节点的射频距离。 G_k 表示节点 k 的等级, $\not\leftrightarrow$ 表示不能建立传输路径。

3.1 网络逻辑拓扑结构

所构建的无线传感器网络拓扑结构具有层次性,即网络节点从功能上分为普通节点和簇头节点。普通节点负责数据的采集和传输,簇头节点还应具有接受并转发数据以及路由寻址的功能,网络路由是在簇头节点上建立的。网络节点被等级标定,相同等级节点具有相同属性,网络路由在不同等级拓扑结构的节点间建立,因此在此拓扑结构上建立的路由具有梯度性。

图 1 为网络逻辑拓扑结构。节点 0 为网络汇聚节点 (Sink Node, SN), 节点 1—10 为网络簇头节点 (Clustering Node, CN), Q 为网络路径传输的数据量。节点 1—5 为第一等级,负责簇内数据融合和接收并转发来自第二等级簇头节点的数据至汇聚节点。节点 6—8 为第二等级,负责簇内数据融合并转发来自第三级簇头节点数据至第一级簇头节点。节点 9 和节点 10 为第三级,负责簇内数据融合并将数据转发至第二级节点。例如:节点 7 为第二等级,在其发射功率覆盖范围内可与第一等级的节点 1—5 和第三等级的节点 9—10 建立传输路径关系,不能与同等级的节点 5 和节点 8 建立传输路径关系。

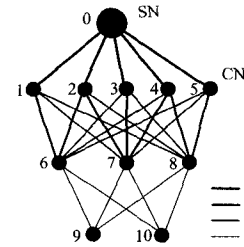


图 1 网络逻辑拓扑结构

3.2 网络物理拓扑结构

物理拓扑结构特征:(1)数据传输和消息广播都具有方向性,在此拓扑结构上建立的传输路径具有梯度方向。数据采集传输至 Sink 节点的方向为 $G_3 \rightarrow G_2 \rightarrow G_1 \rightarrow \text{SN}$,消息广播路径方向则相反,为 $\text{SN} \rightarrow G_1 \rightarrow G_2 \rightarrow G_3$ 。(2)节点与在其发射功率覆盖范围的所有邻级节点都建立了路径关系,利用改进蚁群算法的信息素归一化值作为数据传输路径的选择概率依据,选取最大概率值链路作为传输路径。例如:第二等级的节点 7 与第一等级的节点 1—5 建立的路径,其信息素归一化值不等, $\tau_{7,3} \geq \tau_{7,2} \geq \tau_{7,4} \geq \tau_{7,1} \geq \tau_{7,5}$, τ 表示蚂蚁信息素归一化

值。所以节点 7 与第二等级区域的节点建立的路径是 $Path_{7,3}$ 。(3)在此拓扑结构上建立的传输路径发生故障时,节点选择次概率值链路作为传输路径并依次类推。若链路 $Path_{7,3}$ 发生故障,则节点 7 选择 $Path_{7,2}$ 并依次类推,如图 2 所示。

图 2 为网络物理拓扑结构。根据距离 Sink 节点的远近将网络划分为 3 个不同的等级,并对节点作等级标定。每个节点具有不同的压力度,节点数据在具备不同压力度值的节点之间有向流动。节点 1-5 之间的压力度不等,但其等级都为 1。网络节点图为有向赋权连通图,两点之间的连线都是有向的,且每一条边的权值不等,图中以不同 Q 值表示。

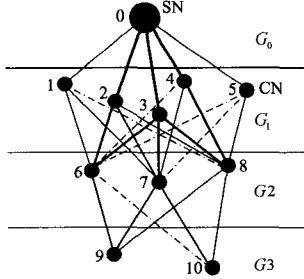


图 2 网络物理拓扑结构

3.3 非均匀等级分簇概率确定

非均匀性指在不同等级区域里采用不等的簇头选举概率进行分簇,构建规模和数量不等的簇。靠近汇聚节点的区域为第一等级,以较大概率选取簇头,各等级依次减小,并最终形成距离汇聚节点越近的区域,簇头数量较多、簇规模较小;距离汇聚节点较远的区域,簇头数量较少,簇的规模较大,如图 3 所示。

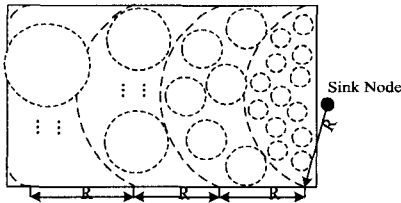


图 3 等级的非均匀分簇

能耗模型参考文献[24],当分成 n 个区域时,第 n 个区域半径为 $n \cdot R$,传感器节点总数为 $N_{n \cdot R}$ 。从半径为 R 区域开始每个区域簇头选取概率为 $p_n (n \in 1, 2, \dots)$ 。则每个区域簇头数为 $N_{n \cdot R} \cdot p_n$,一个簇内非簇头节点总数为 $\frac{1}{p_n} - 1$ 。现假设每个节点只发送 k bit 数据,则在半径为 R 的等级区域内,一个簇头节点能耗为:

$$E_{R \cdot clu} = E_{fuse} * \left(\frac{1}{p_1} - 1\right) * k + E_{dec} * (n-1) * k + E_{dec} * [k + (n-1) * k] + \epsilon_{amp} * [k + (n-1) * k] * d^2$$

$$i \in (1 \dots (N_{n \cdot R} * p_i))$$

$$= E_{fuse} * \left(\frac{1}{p_1} - 1\right) * k + E_{dec} * (2n-1) * k + \epsilon_{amp} * n * k * d^2 \quad (6)$$

簇内非簇头节点能耗为:

$$E_{R \cdot ave} = E_{dec} * \left(\frac{1}{p_1} - 1\right) * k \quad (7)$$

一个簇的总能耗为:

$$E_{R \cdot total} = \sum_1^{N_{n \cdot R} * p_1} (E_{R \cdot clu} + E_{R \cdot ave}) \quad (8)$$

要使得总能耗最小,由 $\frac{\partial E_{R \cdot total}}{\partial p_1} = 0$ 得 p_1 。根据能耗均衡的要求,由 $E_{R \cdot total} = E_{2R \cdot total}$ 得 p_2 ,并依次求得 $p_n (n \in 3, 4, \dots)$ 。

4 仿真测试分析

4.1 等级标定的非均匀分簇

此算法的仿真测试是在处理器为 i3-2100、内存 4G 的 PC 机上,基于 Matlab R2008 环境模拟实现的。在前期研究工作基础上采用改进粒子群算法 (IPSO)^[16,17] 进行仿真测试。仿真参数设置如下,在 $[100, 100]$ 区域内随机部署 150 个节点,区域数 $n=3$,Sink 节点的初始坐标为 $(120, 50)$ 。区域半径 $R=40$,其值由 Sink 节点距离区域远近和 n 值确定。粒子群算法的惯性权重系数 w 设置为从 0.9 到 0.4 线性下降。学习因子 $c_0=1.5, c_j=2$,粒子群数量和规模根据簇头节点选取概率确定。最大迭代次数 m 根据区域节点数量多次试验设定,以保证迭代过程中最后一个粒子与最后一个未与粒子对应的传感器节点重合。 r_0, r_j 为 $[0, 1]$ 之间的随机数, $K = N_{n \cdot R} \cdot p_n$,采用基于节点等级标定的路由算法进行数据传输。

图 4 是在区域 $[100, 100]$ 内随机部署 150 个节点的无线传感器网络节点,以蓝色小圆圈作标注。这些节点未等级标定,所有节点具有相同的属性。在 $(120, 50)$ 的位置部署 Sink 节点,以红色小圆圈作标注。图 5 在图 4 部署的无线传感器网络的基础上进行了等级区域的划分,对其不同等级区域的节点做了相应的等级标定。以距离 Sink 节点作为中心,根据各节点距离 Sink 节点的远近,将所有节点分为 3 个等级,分别以“红”、“蓝”、“绿”色作标记。红色的节点为第一等级区域,蓝色的节点为第二等级区域,绿色的节点为第三等级区域。

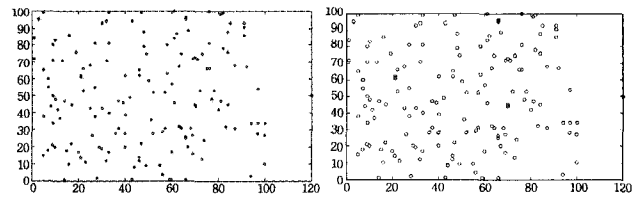


图 4 未等级标定的 WSN 节点 图 5 等级标定的 WSN 节点

图 6 在对节点等级区域标定的基础上,对 3 个等级区域的节点进行了等概率的粒子群分簇,150 个节点被均匀分簇,每个簇的规模大小相当,每个簇里包含 2~4 个节点。图 7 在对节点等级区域标定的基础上,对每个等级区域的节点以不同概率进行了粒子群分簇。在不同的等级区域内形成了规模大小不同的簇。在距离汇聚节点近的第一等级区域内,形成了簇数较多、簇规模较小的分簇。在距离汇聚节点远的第三等级区域内,形成了簇数较少、簇规模较大的分簇模式,达到了预期的分簇效果。

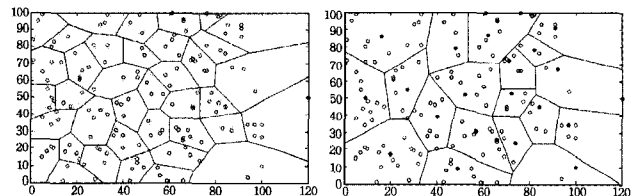


图 6 等级标定的等概率粒子群分簇 图 7 等级标定的非等概率粒子群分簇

表 2 为基于改进粒子群算法的等级标定的非均匀成簇的

数据统计。由表 2 可知,第 1 等级区域节点数为 38,簇选取概率是 0.237,簇数为 9。根据能量均衡的簇概率计算法^[17],计算出第二、三等级的簇选取概率为 0.10 与 0.07,仿真测试统计的相应数据为 0.103 和 0.074。从簇选取概率和簇数及簇成员数可知,其分布规律与设定的拓扑结构一致。

表 2 等级标定的非均匀成簇统计

等级	第 1 等级	第 2 等级	第 3 等级
节点数	38	58	54
簇数	9	6	4
簇成员数	29	52	50
簇选取概率	0.237	0.103	0.074

4.2 非均匀等级分簇能耗分析

无线传感器网络节点被等级标定和非等概率静态分簇后,按照 BWAS 算法^[15]步骤建立传输路由与工作机制来对其能耗状况进行仿真测试。当簇头节点能量消耗达到一定阈值时,主动沿原路径报告信息,以减少信息广播传输能耗。等待传输周期完毕后,簇内根据能量均衡原则动态轮换选举能量较高的节点担当簇头节点,整个网络运用 BWAS 算法进行新一轮的路径信息素的计算,以建立新的拓扑路由。本文在此工作模式下测试网络拓扑结构的能耗性。

4.2.1 不同分簇模式的能耗比较

在两种不同分簇模式下,基于 BWAS 算法建立传输路由来测试其能耗性。第一种分簇模式为无线传感器网络的所有节点都具有相同的等级属性,并基于粒子群的等概率分簇。第二种分簇模式为无线传感器网络所有的节点都具有所构建的拓扑结构特点,将网络划分为 3 个等级区域,不同的等级区域按照能量均衡法计算出来的概率进行分簇,即非等概率分簇。随机观察网络运行至一定的次数下节点的能耗情况,并进行了对比分析,如图 8、图 9 所示。

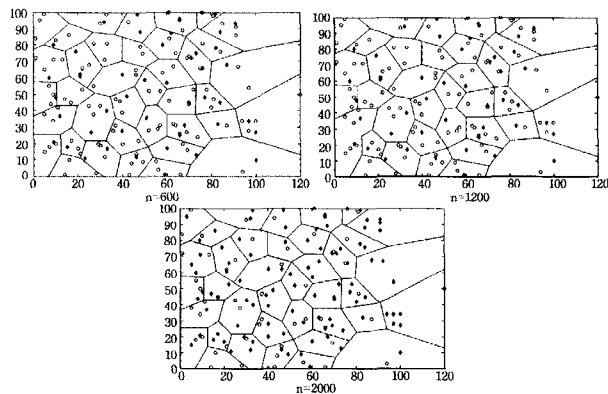


图 8 等概率非等级分簇的能耗

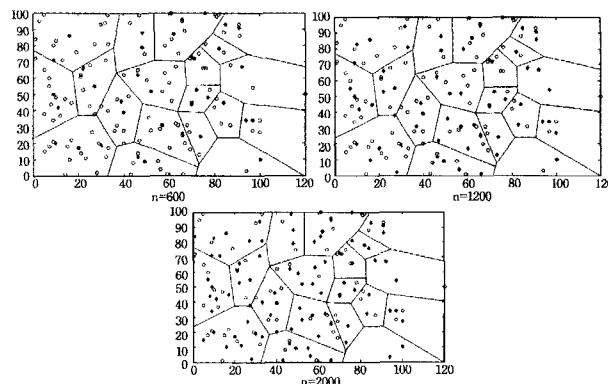


图 9 非等概率等级分簇的能耗

图 8 和图 9 分别示出等概率非等级分簇模式和非等概率等级分簇模式下,无线传感器网络工作循环至 $n=600$ 、1200 和 2000 次时,节点的能耗情况。网络共有节点 150 个。红色的菱形点表示对应的传感器节点能量耗尽。由图 8 和图 9 统计分析可知,两种工作模式运行至 $n=600$ 、1200 和 2000 次时,死亡的节点分别为 21、44、96 和 14、39、72。在第二种工作模式下,节点死亡数量偏少些,节点能耗有所改善。第一种工作模式下,距离 Sink 节点近的节点死亡数较多些,这就是无线传感器网络等概率分簇导致的距离 Sink 节点近的节点需要转发大量的数据而提前死亡的热点问题。相比第二种工作模式,其网络中死亡的节点分布呈随机性,克服了无线传感器网络能耗热点问题。

4.2.2 能耗均衡性分析

当无线传感器网络工作循环至第 600 次、第 1200 次和第 2000 次时,在 3 个等级区域随机抽取 6 个节点,对其剩余能量进行对比分析,如图 10 所示。由此可知:各等级区域内随机抽取的 6 个节点在如上循环次数时的剩余能量相当,不同等级区域间节点的剩余能量也相当。整个无线传感器网络的节点能耗较均衡,不同等级区域总体能耗均衡,避免了无线传感器网络能耗热点问题。

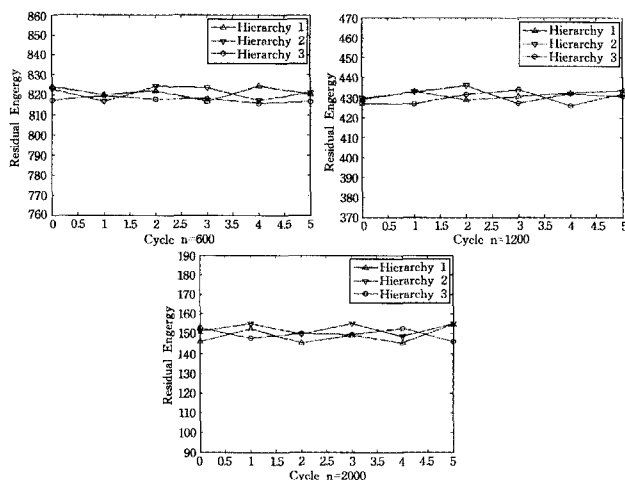


图 10 各等级区域节点剩余能耗对比

结束语 本文分析了血管网络特征以及对构建无线传感器网络拓扑结构的启示,提出了无线传感器网络非均匀等级分簇拓扑结构。根据距离 Sink 节点远近,将网络划分为不同等级区域,并对具有压力差的网络节点进行等级标定。不同等级区域的节点根据改进粒子群算法以不同的概率分簇,形成不同等级区域具有密度和规模不等的非均匀等级分簇拓扑结构。

通过仿真分析表明,此分簇拓扑结构能优化网络分簇,均衡网络节点能耗,避免距离汇聚节点近的簇头节点因转发数据负荷量大而提前死亡。尤其对于大规模无线传感器网络,此结构在延长网络生命期、提高网络能效等方面具有较明显的优势。

参考文献

- [1] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey [J]. Computer Networks, 2008, 52: 2292-2330

- [5] Bian K G, Park J M. MAC-layer misbehaviors in multi-hop cognitive radio networks[C]//US-Korea Conference on Science, Technology, and Entrepreneurship (UKC2006). 2006:65-73
- [6] Sethi A, Brown T X. Potential cognitive radio denial-of-service vulnerabilities and countermeasures[C]//International Symposium on Advanced Radio Technologies. February 2007:236-242
- [7] Raya M, Hubaux J P, Aad I. DOMINO: a system to detect greedy behavior in IEEE 802.11 hotspots[C]//Proc of Mobi-Sys. 2004:42-50
- [8] Radosavac S, Baras J S, Koutsopoulos I. A framework for MAC protocol misbehavior detection in wireless networks[C]//Proc of the 4th ACM Workshop on Wireless Security (WiSE'05). 2005:98-105
- [9] Shamir A. Identity-based cryptosystems and signature schemes [C]//Blakley G R, Chaum D C, eds. Advances in Cryptology- Proceedings of CRYPTO '84. California: Springer-Verlag, LNCS, 1985, 196:48-53
- [10] Boneh D, Franklin M. Identity-Based Encryption from the Weil Pairing [C] // Kilian J, eds. Advances in Cryptology-Crypto 2001, LNCS 2139. California: Springer-Verlag, 2001:231-229
- [11] Boneh D, Boyen X. Efficient Selective-ID Identity Based Encryption Without Random Oracles[C]//Cachin C, Camenisch J, eds. Advances in Cryptology-EUROCRYPT '2004, LNCS 3027. Switzerland: Springer-Verlag, 2004:223-238
- [12] Boneh D, Boyen X. Secure Identity Based Encryption Without Random Oracles[C]//Franklin M K, eds. Advances in Cryptology-Crypto 2004, LNCS 3152. California: Springer-Verlag, 2004:443-459
- [13] Waters B. Efficient Identity-Based Encryption Without Random Oracles[C]//Cramer R, eds. Advances in Cryptology-EUROCRYPT'2005, LNCS 3494. Denmark: Springer-Verlag, 2005:114-127
- [14] Gentry C. Practical Identity-Based Encryption Without Random Oracles[C]//Vaudenay S, eds. Advances in Cryptology-EUROCRYPT'2006, LNCS 4004. Russia: Springer-Verlag, 2006:445-464
- [15] 南相浩, 唐文, 余嘉宁. ECC 组合公钥[C]//中国计算机学会信息安全专业委员会论文集. 2001
- [16] 徐鹏, 崔国华, 雷凤宇. 非双线性映射下一种实用的和可证明安全的 IBE 方案[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(10):1687-1695
- [17] 徐鹏, 崔国华, 雷凤宇, 等. 标准模型下一种实用的和可证明安全的 IBE 方案[J]. 计算机学报, 2010, 33(2):335-344
- [18] Chen R, Park J M, Bian K. Robust distributed spectrum sensing in cognitive radio networks[C]//Proceedings of The 27th Conference on Computer Communications, INFOCOM 2008. IEEE, Apr. 2008:1876-188

(上接第 52 页)

- [2] Ahmed A, Mohamed Y. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks[J]. Comput. Commun., 2007, 30(14/15):2826-2841
- [3] 黄河清, 沈杰, 姚道远, 等. 无线传感网自适应能量驱动簇头轮换算法研究[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5):1040-1044
- [4] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, 2000:10-15
- [5] 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
- [6] Chan H, Perrig A. ACE: An Emergent Algorithm for Highly Uniform Cluster Formation in Wireless Sensor Networks[C]//First European Workshop, EWSN 2004. Berlin, 2004
- [7] Wang Y, Zhao Q, Zheng D. Energy-driven adaptive clustering data collection protocol in wireless sensor networks[C]//International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation. Chengdu, 2004:599-604
- [8] Gamwarige S, Kulasekera E. An algorithm for energy driven cluster head rotation in a distributed wireless sensor network [C]//Proceedings of the International Conference on Information and Automation(ICIA2005). Hong Kong, 2005:354-359
- [9] 刘志, 裘正定. 基于分环多跳的无线传感网分簇路由算法[J]. 通信学报, 2008, 29(3):104-113
- [10] Tatiana B, Nirupama B, Sanjay J. SASHA: Toward a self-healing hybrid sensor network architecture [C] // The Second IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors. 2005:71-78
- [11] Amir J, Walter L. Advanced Bio-Inspired Plausibility Checking in a Wireless Sensor Network Using Neuro-Immune Systems [C]//The Fourth International Conference on Sensor Technologies and Applications. 2010:108-114
- [12] Chen Y J, Yuan S F, Wu J, et al. Performance optimization for wireless sensor networks based on immune system [J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(5):1065-1069
- [13] Teng Rui, Leibnitz K, Zhang Bing. Immune System Inspired Reliable Query Dissemination in Wireless Sensor Networks[C]//10th International Conference on Artificial Immune Systems. 2011:282-293
- [14] Baris A, Ozgür B A. Immune system based distributed node and rate selection in wireless sensor networks [C]//1st Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems. 2006
- [15] Li H B, Yu C B, Quan X L, et al. Fault-Tolerant Vascular Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks [J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(2):56-61
- [16] Kao Yu-cheng, Lee S-Y. Combining K-means and Particle Swarm Optimization for Dynamic Data Clustering Problems[C]//IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems(ICIS 2009). 2009:757-761
- [17] Li H B, Yu C B, Yan J H, et al. Clustering strategy for energy balance of wireless sensor networks based on improved particle swarm optimization clustering algorithm [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(2):657-660
- [18] Goh K-I, Salvi G, Kahng B, et al. Skeleton and Fractal Scaling in Complex Networks [J]. Phys. Rev. Lett., 2006, 96(1):1-4