

## 一种综合能量和节点度的传感器网络分簇算法\*

刘志新, 郑庆超<sup>+</sup>, 薛亮, 关新平

(燕山大学 电气工程学院 网络控制与生物信息研究中心, 河北 秦皇岛 066004)

### Energy and Node Degree Synthesized Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks

LIU Zhi-Xin, ZHENG Qing-Chao<sup>+</sup>, XUE Liang, GUAN Xin-Ping

(Center for Networking Control and Bioinformatics, Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)  
+ Corresponding author: E-mail: zhengzheng1987@126.com

Liu ZX, Zheng QC, Xue L, Guan XP. Energy and node degree synthesized clustering algorithm for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2009,20(Suppl.):250-256. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/09029.htm>

**Abstract:** In clustering algorithm of wireless sensor networks, to solve the problem of excessive energy consumption in the cluster heads, an residual energy and node degree synthesized clustering algorithm named ENCA (energy and node degree synthesized clustering algorithm) is proposed in this paper. In cluster heads election phase of every round, it considers the residual energy and the average energy of all the nodes in each cluster, an optimal cluster head is elected in each cluster according to node degree. In algorithm running phase the connection of the network is guaranteed, in the mean time, it is avoided to select the node with low energy as cluster head. Simulation results show that, in comparison with LEACH and ACE, the node energy consumption is balanced and the network lifetime is efficiently prolonged in ENCA algorithm.

**Key words:** wireless sensor network; clustering; residual energy; node degree; network lifetime

**摘要:** 针对无线传感器网络分簇过程中簇首耗能过快问题,提出了一种综合节点剩余能量和节点度数进行簇首选取的分簇算法 ENCA(energy and node degree synthesized clustering algorithm).该算法在每轮的簇首选取中考虑了每个簇内所有节点的剩余能量和平均剩余能量,并在每个簇中依据节点的度数优化簇首的选择.在算法运行过程中,在保证网络连通的同时,避免了能量较低的节点当选为簇首.仿真结果表明,与 LEACH 算法和 ACE 算法相比,ENCA 算法均衡了网络中节点的能量消耗,有效延长了网络寿命.

**关键词:** 无线传感器网络;分簇;剩余能量;节点度数;网络寿命

无线传感器网络作为新兴的测控网络技术<sup>[1,2]</sup>,是能够实现自主数据采集、融合和传输应用的智能网络应用系统.它由部署在观测环境内的大量具有无线通信和计算能力的微型传感器节点构成,通过节点的协同工作来采集和处理目标区域的信息.

传感器网络由能量有限的电池供电,在部署后难以再次补充能量.通过有效地使用传感器节点的能量来延长网络寿命是网络路由协议的重要设计目标<sup>[3]</sup>.对无线传感器网络而言,网络分层路由协议对网络性能有重大

\* Supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China under Grant No.60525303 (国家杰出青年基金); the Hebei Provincial Educational Foundation of China under Grant No.2008147 (河北省教育厅基金)

Received 2009-05-01; Accepted 2009-07-23

影响<sup>[4]</sup>,而且是节省能量延长网络寿命的重要因素,采用基于分簇的路由算法相对平面路由算法具有更好的适应性和节能性<sup>[5]</sup>.分簇算法通过一定的机制产生簇首节点和簇内成员节点,簇首协调和管理簇内各成员节点的工作,负责簇内信息的收集、融合和转发.其中,合理选择簇首是分簇算法中必须考虑的一个重要问题.

在当前较流行的分簇算法中,ACE(algorithm for cluster establishment)算法是一种簇首分布均衡的无线传感器网络分簇算法<sup>[6]</sup>.然而,该算法在簇首选举过程中未考虑能量因素,分簇过程结束后被选为簇首的节点将一直担任簇首,直至因过度耗能而死亡.本文针对ACE算法中存在的问题,在其基础上进行分析与改进,提出了一种基于节点剩余能量和节点度数来循环选取簇首的算法ENCA.该算法在每轮的簇首选举中考虑了所有节点的剩余能量,有效避免了能量较低的节点被选为簇首.仿真结果表明,该算法在确保网络连通性的基础上有效减少了簇与簇之间的重叠区域,延长了网络寿命,验证了算法的有效性.

## 1 相关工作

分簇路由协议的研究是无线传感器网络研究的一个重要组成部分.在目前典型分簇路由算法中<sup>[6-9]</sup>,Heinzelman等人提出的LEACH(low-energy adaptive clustering hierarchy)算法是最具代表性的分簇路由算法之一<sup>[7]</sup>.该算法是一种自适应分簇拓扑算法,在运行过程中循环执行簇的重构过程,通过轮换方式随机选取簇首.它的执行过程是周期性的,每轮循环分为簇的建立阶段和簇的稳定阶段.该算法能够保证每个节点以相等概率当选簇首,均衡了网络中节点的能耗,但该簇首选取机制没有考虑节点的具体地理位置与剩余能量,不能保证簇首均衡地分布在网络中.HEED(hybrid, energy-efficient distributed clustering approach)协议以节点剩余能量和簇内通信代价作为参数<sup>[8]</sup>,周期性地通过迭代的方式实现分簇.它能够在常数次迭代后结束分簇且簇首分布良好,但它的簇生成过程需要在簇半径内进行多次迭代,由此将带来很大的通信开销.GAF(geographical adaptive fidelity)算法以节点的地理位置为依据将检测区域划分为虚拟单元格<sup>[9]</sup>.节点依据位置信息划入相应单元格,每个单元格中定期选取簇首.该算法需要运用GPS获取所有节点的位置信息,算法较为复杂,在实际运行中不易实现.

文献[10,11]提出了两种利用加权因子进行分簇的算法,其中WCA(weighted clustering algorithm)算法将节点的剩余能量、节点度数、节点的相对位置信息和移动性作为参数<sup>[10]</sup>,通过选取适当的加权系数计算每个节点的权值.在邻居节点中权值最小的节点将当选簇首,其邻居不在参与选举.DCA(distributed clustering algorithm)算法根据节点适合当簇首的程度为每个节点分配一个不同的权值<sup>[11]</sup>,权值较高的节点优先决定自身角色.基于权值的分簇算法考虑了形成簇首的多种因素,选取的簇首也更加合理,但算法中对权值因子的选择是人为的,没有更具说服力的模型来描述.文献[12]在假设节点位置已知的情况下,通过比较节点对被监测区域的覆盖能力,优先选择对覆盖贡献较小的节点担任簇首,在算法运行中取得了较好的覆盖效果.

本文设计的算法具有如下主要特点:1) 算法不需要节点的位置信息;2) 算法中每个节点只需要了解局部范围内节点的信息,这使得它适合拓扑动态频繁变化的无线传感器网络;3) 通过局部信息交换,节点可以及时获知周围节点的能量水平,低能量的节点将被避免选为簇首,有效地解决了分簇算法中簇首过早死亡的问题.

## 2 ENCA 算法设计

这一节,我们将详细描述 ENCA 算法.首先给出本文采用的网络模型,定义算法中的参数.

### 2.1 网络模型

设有  $n$  个传感器节点随机分布在一个二维平面区域,且假设该网络具有以下性质:

- ① 传感器节点部署后不再移动.
- ② 传感器节点同构,并在网络中地位、作用相同,具备数据融合的功能,每个节点有唯一的标识(ID).
- ③ 节点具有感知半径  $R_s$ 、广播半径  $R$  和数据传输半径  $R_t$ ,且  $R_t > R > R_s$ .
- ④ 网络中所有节点的发射功率固定,节点可根据接收信号的强度(RSSI)计算出距发送者的近似距离<sup>[13]</sup>.

本文采用与文献[7]相同的无线通信能量消耗模型.当节点  $a$  向距离  $d$  以外的节点  $b$  发送  $l$  比特的数据包时, $a$  消耗的能量由发射电路损耗和功率放大损耗两部分组成,即

$$E_T(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ lE_{elec} + l\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $E_{elec}$  表示节点发射电路的损耗.若传输距离小于阈值  $d_0$ ,则功率放大损耗采用自由空间模型,否则采用多路径衰减模型.  $\epsilon_{fs}$ ,  $\epsilon_{mp}$  分别为这两种模型功率放大所需的能量.当节点  $b$  接收节点  $a$  发送的信息时,其无线接收装置所需能耗为

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

## 2.2 ENCA算法描述

ENCA 算法是一种基于竞争思想的分布式算法,以节点的剩余能量作为节点能否成为簇首的首要条件.下面介绍本文研究中使用的定义,网络中所有节点的集合用  $N$  表示.

**定义 1(节点度数).** 在  $N$  中,任一节点  $i$  的广播半径  $R$  范围内所包含的邻居节点数目称为该节点的节点度数,记为  $D_{egree}(i)$ .

**定义 2(候选簇首).** 在  $N$  中,若节点  $i$  的剩余能量  $E_s(i)$  大于该节点所属簇内所有节点的平均剩余能量  $E_{av}(i)$ ,则节点  $i$  称为该簇的候选簇首.

**定义 3(成员节点).** 分簇过程结束后,节点  $i$  可能被多个簇首覆盖,但节点  $i$  只与某一簇首  $j$  通信,则称节点  $i$  为簇首  $j$  的成员节点.

无论在簇的建立阶段还是网络的稳定运行阶段,簇首都起着关键作用.它不仅需要负责管理本簇内的所有成员,还要对成员节点发送的数据进行融合处理并最终转发至基站.在一次信息传递中,簇首消耗的能量为

$$E_{CH} = lE_{elec}k + lE_{BF}(k+1) + l(E_{elec} + \epsilon_{mp}d_{BS}^4) \quad (3)$$

其中, $k$  为簇首的成员节点数目,  $d_{BS}$  代表簇首到基站的距离,  $E_{BF}$  为簇首进行数据融合所消耗的能量.

网络中的节点在 ENCA 算法中被定义为 3 种状态:簇首、簇成员和未分簇状态.在算法的初始阶段,网络中的所有节点将以固定的发射功率向外广播自己的信息,其中信息包含自己的 ID 号、剩余能量、邻居节点数目及目前的状态.每个节点将依据接收到的信息个数统计其节点度数.为了让节点度数大于一定数值的节点能够成为簇首,同时减少未分簇的节点数目,我们对文献[6]中的阈值函数进行了重新定义:

$$f_{\min} = \lambda \left( e^{-k_1 \frac{t}{cI}} - k_2 \right) D \quad (4)$$

其中, $c, I$  分别表示节点期望的平均迭代次数和两次迭代之间的间隔时间; $t$  代表传感器节点从运行到当前的时间; $k_1, k_2, \lambda$  为被选为决定  $f_{\min}$  初值的常数,它们将影响算法运行过程中每轮的簇首数目.该式中  $D$  为在节点的广播半径  $R$  内期望的节点数目,它可以表示为

$$D = \frac{\pi R^2}{S} \times n \quad (5)$$

其中, $S$  与  $n$  分别表示传感器网络的部署区域面积和节点数目.

$f_{\min}$  是一个随时间逐渐衰减的函数,这将保证网络运行中只有少量节点不属于任何簇首.当节点的节点度数大于  $f_{\min}$  时,它将对外宣布自己是簇首的消息.若节点的 1 跳范围内同时存在两个或以上节点的度数大于  $f_{\min}$  的情况,则 ID 号较大的节点将采用退位机制,在本轮放弃成为簇首.剩余节点依据接收的簇首信号强弱选择加入离自己最近的簇首,并向簇首广播一个加入信息.本轮未收到任何簇首消息的节点将作为未分簇节点进入休眠状态,等待下一轮的选取.簇首将依据接收到的节点信息统计其成员节点个数和每个节点的剩余能量.

网络稳定运行阶段,簇首将根据簇内成员节点数目创建 TDMA 时间表并通知每个节点发送数据的时隙.每个簇的成员节点将在分配的时隙内向簇首发送数据.为了防止无线通信中出现的信号冲突,在此采用与 LEACH 相同的 MAC 协议,具体见参考文献[7].

在 ENCA 算法中,簇首每向基站转发 200 次数据称为一轮.在下一轮开始时,任一簇首  $i$  将统计本簇内成员节点的剩余能量,并计算簇内所有节点的平均剩余能量  $E_m(i)$ .簇首  $i$  将在候选簇首中选取节点度数最大的节点作为本轮簇首,并向其成员节点广播新簇首的 ID 号,同时宣布自己的退位消息.网络中被提名的簇首将广播自己成为簇首的消息,属于簇首  $i$  的成员节点以及未分簇节点将根据接收到的簇首信号强弱决定加入哪个簇.

未收到任何簇首消息的节点将通过对比节点度数和本轮  $f_{min}$  的值决定是否生成新簇.若其节点度数大于本轮  $f_{min}$  的值,则该节点将宣布自己是簇首的消息,否则进入休眠状态,等待下一轮选取.若节点的能量耗尽,则认为节点已经死亡,退出算法的执行.当网络中所有节点的能量耗尽时,则认为迭代过程结束.

下面通过两个定理来证明算法 ENCA 消息复杂度的有界性,分析簇首分布的性质.

**定理 1.** 在整个网络中,ENCA 算法的消息复杂度是  $O(n)$ .

证明:从算法操作可知,簇的建立阶段每个节点发送信息的个数是常数,网络中共广播  $n \times 2$  条消息.在每轮的簇首转移过程中,前一轮簇首和本轮簇首均广播 1 条信息,收到簇首信息的节点则广播 1 个加入消息.因此,整个网络内的消息复杂度是  $O(n)$ . □

**定理 2.** 任意一个簇首的广播半径  $R$  范围内不存在另外一个簇首.

证明:算法 ENCA 采用了退位机制,网络中每个节点都有唯一的 ID 标识.初始阶段,在节点的广播半径  $R$  范围内,只有节点度数大于  $f_{min}$  且 ID 号最小的节点才被选为簇首.簇首转移和生成阶段,相邻簇首中 ID 号较大的节点将在本轮放弃成为簇首.因此,在任意一个簇首  $R$  范围内不存在其他簇首. □

### 3 仿真与分析

为了证明算法的有效性,我们编写程序对 ENCA 协议的各个性能指标进行了仿真与评估,并将 ENCA 算法与 LEACH 和 ACE 算法进行比较.首先设置本协议所用到的参数,  $k_1, k_2$  的取值与文献[6]相同,即  $k_1=2.3, k_2=0.1$ .在多次仿真实验中发现,当  $\lambda=0.5$  时,每轮产生的簇首分布比较均匀.在能量消耗方面,我们采用与 LEACH 相同的设置,仿真实验的参数见表 1.

**Table 1** Relevant parameters for network initializing

**表 1** 网络环境参数设置

Parameter	Value
Network size	$(100 \times 100) \text{m}^2$
Node number	100
Radio range	25m
BS position	$(50\text{m}, 150\text{m})$
Initial energy	2J
$E_{elec}$	50nJ/bit
$E_{BF}$	5nJ/bit
$\epsilon_{fs}$	10pJ/(bit·m <sup>2</sup> )
$\epsilon_{mp}$	0.0013pJ/(bit·m <sup>4</sup> )
$d_0$	86.3m
$l$	4 000bits

#### 3.1 簇首的分布

在网络拓扑结构固定的情况下,一个稳定的分簇协议应在每轮生成数目一致的簇首,同时这些簇首应能覆盖到整个网络.假设相邻两个簇之间没有重叠,簇首数目  $K$ 、节点广播半径  $R$  与网络部署面积  $S$  之间的关系为

$$K \times \pi R^2 \geq S \tag{6}$$

文献[7]中给出了相同设置条件下簇首数目的最优值为  $K=5$  个.如果簇首数目过少,则网络中将有大量节点得不到覆盖,节点的信息需要传输很长的距离才能到达簇首.同样,若网络中簇首的数量大于 5 个,则在簇首处将不会有足够的信息得到融合.将  $K$  值代入公式(6)可得  $R \geq 25.8\text{m}$ .在图 1 中我们给出了 ENCA 算法每轮生成的簇首数目与  $R$  的关系.从图中我们可以观察到当  $R=25\text{m}$  时,每轮产生的簇首数目比较均匀,平均值为 6.4 个,在算法运行中起到了较好的覆盖效果.在网络运行后期,由于死亡节点的增加,簇首的数目逐渐下降.

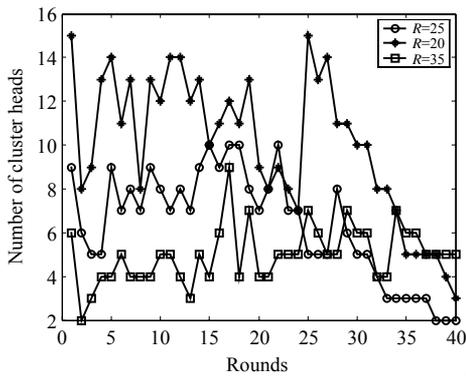


Fig.1 Relationship between radio range and number of cluster heads

图1 节点广播半径与簇首数目的关系

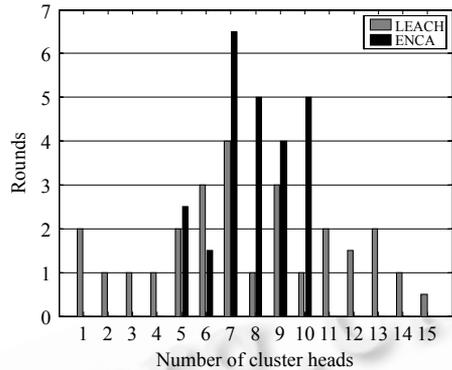


Fig.2 Number's distribution of cluster heads

图2 簇首数目的分布统计

在图2中,我们分别对 LEACH 和 ENCA 算法中簇首的分布情况进行了统计.由于在节点初始能量同为 2J 的情况下,LEACH算法每次运行都不超过 30 轮,我们取前 25 轮进行比较.从每种分簇协议的仿真实验中随机选取 100 次实验,并对每次实验中每一轮产生的簇首数目取平均值,统计了两种算法运行过程中簇首数目与出现的轮数之间的关系.

ENCA 算法中每轮的簇首都由前一轮的簇首选定,在生成新簇的过程中采取了退位机制,簇首数目浮动较小.通过对比图2中的数据,可以看到,ENCA 算法每轮产生的簇首数目分布比较均匀.由于 LEACH 算法仅依靠节点产生的随机数和阈值来选取簇首,簇首变化比较明显,在网络运行一段时间以后,随着节点的大量死亡,簇首分布比较分散.因此,ENCA 算法能够更好地协调管理网络中的节点,确保传感器网络的连通性.

### 3.2 能量效率

分簇算法中,高效地使用能量是延长网络寿命的一个重要因素.图3中分别对 LEACH 和 ENCA 算法的耗能情况进行了仿真对比.在簇的建立阶段和稳定运行阶段,两种算法均采用相同的时间设置,具体见文献[7].

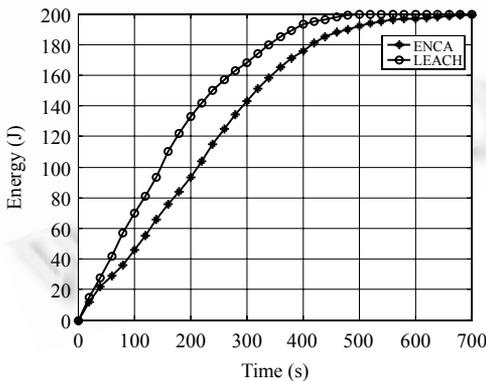


Fig.3 Total amount of energy dissipated in the system over time

图3 网络能耗随时间的变化

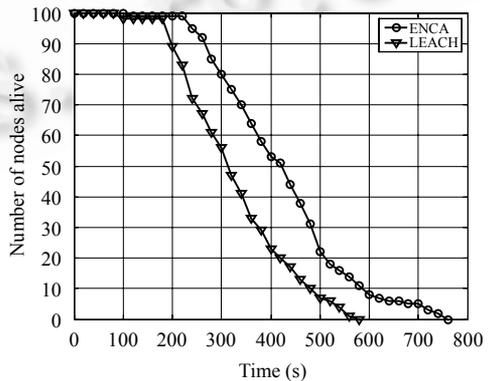


Fig.4 Lifetime of network

图4 网络生命周期

通过观察分析图3可以看到,在同一工作时间内,ENCA 算法的能量消耗明显低于 LEACH 算法.这是因为在 LEACH算法中,簇首广播的信息必须确保网络中所有节点都能收到,节点也要用较大的广播半径  $R$  向簇首发

送信息,这将消耗大量的能量. ENCA 算法中,簇首以固定的  $R$  进行广播,每个簇中节点到簇首的距离均小于  $R$ ,所以节点将使用较小的  $R$  与簇首进行通信以节省能量.因此,ENCA 算法与 LEACH 算法相比,能够更高效地使用网络中节点的能量.

### 3.3 网络寿命

在图 4 中,我们将 ENCA 算法的网络寿命与 LEACH 进行了对比.在相同的参数设置条件下,从以上两种协议的仿真实验中分别对每轮过后网络中存活节点数目进行统计.我们选取 300 次仿真实验进行统计,对每轮中存活节点数目取平均值.

在本文中,网络寿命定义为从网络开始运行到全网中所有节点死亡持续的时间.可以看到,ENCA 算法的网络寿命比 LEACH 延长了将近 30%.由于节点死亡率的降低,在整个工作时间内,ENCA 算法使得被观测区域中有更多的传感器节点参与工作,有效提高了网络的工作效率.

ACE 算法在簇首选举过程中没有考虑节点的剩余能量,簇首一旦选定后则不再采用轮换机制,这将导致被选为簇首的节点在短时间内就因能量耗尽而无法正常工作.在我们的仿真实验中,网络中所有簇首的运行时间均不超过 150 秒.由于基站无法直接从节点处获得数据,剩余节点的能量将得不到有效利用,所以网络在短时间便失去对被监测区域的监视能力.

## 4 结 论

本文提出了一种能量高效的分簇算法 ENCA.其核心思想是,在每轮簇首选举过程中考虑每个簇内节点的剩余能量和该簇内所有节点的平均剩余能量,依据节点的节点度数在候选簇首中选取簇首.仿真结果表明,与 LEACH 和 ACE 相比,该算法平衡了网络中节点的能耗,优化了簇首的选择,显著延长了网络的存活时间.

### References:

- [1] Akyildiz IF, Su WL, Sankarasubramanian Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8):102–114.
- [2] Ren FY, Huang HN, Lin C. Wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2003,14(7):1282–1291 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm>
- [3] Li JZ, Li JB, Shi SF. Concepts, issues and advance of sensor networks and data management of sensor networks. *Journal of Software*, 2003,14(10):1717–1727 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1717.htm>
- [4] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramanian Y. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 2002,8(38):393–422.
- [5] Yi SH, Heo JY, Cho YK, Hong JM. PEACH: Power-Efficient and adaptive clustering hierarchy protocol for wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2007,30:2842–2852.
- [6] Chan HW, Perring A. ACE: An emergent algorithm for highly uniform cluster formation. In: *Proc. of the 1st European Workshop on Sensor Networks (EWSN)*. Berlin, 2004. 154–171.
- [7] Heinzelman WR, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: *Proc. of the 33rd Hawaii Int'l Conf. on System Sciences*. Hawaii, 2000. 660–670.
- [8] Younis O, Fahmy S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2004,3(4):366–379.
- [9] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-Informed energy conservation for ad hoc routing. In: *Proc. of the ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*. New York: ACM Press, 2001. 70–84.
- [10] Chatterjee M, Das SK, Turgut D. WCA: A weighted clustering algorithm for mobile ad hoc networks. *Cluster Computing*, 2002,5: 193–204.
- [11] Basagni S. Distributed clustering algorithm for ad-hoc networks. In: *Proc. of the 4th Int'l Symp. on Parallel Architectures, Algorithms, and Networks (I-SPAN)*. 1999. 310–315.
- [12] Stanislava S, Heinzelman WB. Cluster head election techniques for coverage preservation in wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2009,7:955–972.

- [13] Gibson J. The Mobile Communications Handbook. 2nd ed., Boca Raton: CRC Press, 1999. 23-34.

附中文参考文献:

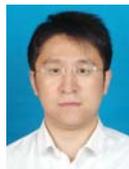
- [2] 任丰原,黄海宁,林闯.无线传感器网络.软件学报,2003,14(7):1282-1291. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm>
- [3] 李建中,李金宝,石胜飞.传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展.软件学报,2003,14(10):1717-1727. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1717.htm>



刘志新(1976-),男,河北唐山人,博士,副教授,主要研究领域为无线网络拥塞控制,无线传感器网络拓扑控制.



郑庆超(1987-),男,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络路由算法.



薛亮(1982-),男,博士生,主要研究领域为无线传感器网络协议.



关新平(1963-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为网络控制系统,无线传感器网络,鲁棒控制.