

无线传感网自适应能量驱动簇头轮换算法研究

黄河清 沈杰 姚道远 马奎 刘海涛

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所无线传感网与通信重点实验室 上海 200050)

摘要:分簇结构是大规模无线传感网(WSN)的一种有效的拓扑管理方法。在这种结构下,由于簇头(Cluster Head, CH)节点的能耗速率远高于簇成员节点(Cluster Member, CM),需要做簇头轮换以平衡网络能耗。该文分析了基于能量驱动的分簇轮换策略,并提供一种基于簇头节点实时负载来估计其启动轮换的能量阈值的自适应簇头轮换算法(Adaptive Cluster Rotation Algorithm, ACRA)。仿真结果表明,与现有算法如 LEACH, EDAC 等比较, ACRA 算法最少化簇头轮换次数,延长了网络生存时间。

关键词:无线传感网;分簇;轮换;能量驱动

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)05-1040-05

An Energy-Driven Adaptive Cluster Head Rotation Algorithm for Wireless Sensor Networks

Huang He-qing Shen Jie Yao Dao-yuan Ma Kui Liu Hai-tao

(Key Lab of Wireless Sensor Network and Communication, Institute of Micro-system and Information Technology, Chinese Academy of Science, Shanghai 200050, China)

Abstract: Cluster-based Topology is an energy-efficient topology control method in large-scale wireless sensor networks. The cluster head depletes energy more faster than cluster member and the rotation of cluster head is needed to balance the energy consumption for the whole network. In this paper, ACRA is presented, which rotation energy threshold is estimated using cluster head real-time energy load. The simulation result show that comparing with LEACH and EDAC, ACRA minimizes the rotation times, prolongs the network lifetime.

Key words: Wireless sensor network; Clustering; Rotation; Energy-driven

1 引言

能量受限是无线传感器网络的一个重要特征。如何在能量受限的条件下设计网络协议以尽量提高网络的生存时间是无线传感网研究的主要方向之一。

对于大规模的无线传感网而言,基于分簇的网络拓扑结构在拓扑管理、能量效率、数据融合与节点协同处理方面都具有明显的优势。分簇的结构将大规模的网络划分为多个小规模的网络,从而降低了拓扑管理的难度,同时可以引入节点睡眠机制而不影响网络连通性,便于数据融合,减少了信道接入的竞争从而提高网络吞吐量,对节点的协同处理提供了良好的物理支持,可有效的降低网络开销,延长网络寿命^[1]。

在这种网络结构中,节点分布式地组织成以簇为单位的结构,每个簇包含一个簇头(Cluster Head, CH)节点与多个簇成员(Cluster Member, CM)节点,簇头节点承担簇内数据收集、处理与簇间寻路与数据转发等功能,簇成员节点负责将收集的数据上传至其簇头节点。由于簇头节点负担的任

务量大大超过簇成员节点,将比簇成员节点更快速地消耗完自身能量。因此,需要采取措施平衡簇内节点的能量消耗以延长网络生存时间。

为了平衡簇内节点的能量消耗,一般采用簇头轮换的策略。通过簇头轮换,使得网络中的每个节点都有机会担当簇头,从而平衡各节点的能耗。现有分簇算法的簇头轮换策略包括周期性轮换与能量阈值触发轮换两种。LEACH^[2]、HEED^[3]、ACE^[4]等以预设的时间周期为单位进行全网簇头轮换与拓扑重建;EDAC^[5]、EDCR^[6]等则基于动态计算的能量阈值 E_{th} 来触发簇头轮换过程。基于时间周期的轮换策略可以较好地均衡网络能耗,但是其每次轮换都是全网进行,导致网络功能的中断。同时造成大量不必要的能量浪费,而且,轮换周期难以确定。而基于能量阈值的轮换策略可以把轮换的影响限制在极小的范围内(本簇内或扩展到邻居簇),而为了最小化能量浪费,最大化网络生存时间,需要设置合适的能量阈值。

近年来对于簇头轮换的能量阈值的研究亦有所进展,文献[7]中,分析了 EDAC, EDCR 等算法采用的能量阈值计算方式,并给出了特定条件限制下的最优解,文献[8]中,以单簇为研究对象,分析证明了能量驱动的簇头轮换策略优于时

间驱动的簇头轮换策略, 并给出了单簇模型下的次优解求解方法, 但是其均局限于单挑的网络模型, 并假定各簇的簇头流量负载均等, 这并不符合大规模无线传感网中的实际情况。

本文中分析了基于分簇结构的随机分布无线传感网的能量消耗情况, 在此基础上给出了一种基于负载的簇头轮换能量阈值的计算方法, 同时, 给出了一种跨层设计的分簇拓扑建立与自适应簇头轮换算法(Adaptive Cluster Rotation Algorithm, ACRA)。算法结合 MAC 层的超帧调度机制, 实现分簇拓扑的快速建立与故障恢复, 在网络正常工作阶段, 簇头依据节点剩余能量在簇内选择备份簇头节点, 在簇头能量达到阈值或簇头意外失效的情况下, 备份簇头迅速接替原簇头成为新的簇头, 并接管大部分原簇成员节点, 无法接入新簇头的节点选择加入邻居簇, 从而在本地完成拓扑重建工作。

2 模型分析

2.1 系统模型

设有 n 个传感器节点随机布设在面积 $A = 4a^2$ 的区域中, 节点分布满足 Poisson 分布。节点支持二级通信功率, 即簇内通信功率与簇间通信功率。节点的初始能量相同, 均为 E_0 。在网络的数据收集阶段, 簇成员节点向其簇头发送的数据, 簇头节点收集簇内数据并作相应处理后以多跳方式将数据上传至 Sink 节点, 同时承担其邻居簇的数据转发工作。

不失一般性, 假定数据汇聚节点 Sink 位于区域中心, 如图 1 所示, 设坐标为 $(0,0)$, 设 D_i 表示坐标为 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, n$ 的节点 i 到 Sink 的距离, 则有^[9]

$$E[D_i | M = n] = \int_A \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \left(\frac{1}{4a^2} \right) dA = 0.765a \quad (1)$$

假设网络中簇头的比例为 p , 即网络中共有 np 个簇头, 由文献[10]的分析可知, 簇头节点与簇成员节点均服从独立的泊松分布, 可设簇头集合为密度 $\lambda_1 = p\lambda$ 的泊松分布 PP1, 簇成员节点集合为密度 $\lambda_0 = (1-p)\lambda$ 的泊松分布 PP2, 可知, 簇头节点至 Sink 的距离之和为 $0.765npa$, 且对于簇内

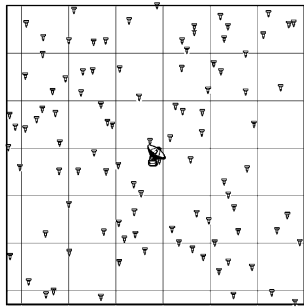


图1 网络拓扑结构

节点数 N_v 有

$$E[N_v | M = n] \approx E[N_v] = \lambda_0 / \lambda_1 = (1-p)/p \quad (2)$$

2.2 能耗分析

对于数据收集的网络来说, 节点的总能耗 E_t 可分为维护网络拓扑的额外能耗 E_a 与用于数据传输的有效能耗 E_e , 定义节点的能量效率为 η , 有^[5]

$$\eta = E_e / E_t = E_e / (E_e + E_a) \quad (3)$$

时间驱动的簇头轮换算法如 LEACH, HEED 等依据时间周期性的启动簇头轮换过程, 轮换频繁且每次轮换均为全网行为, 其额外能耗 E_a 较高, 虽然可以获得较平均的节点能耗分布, 但是能量效率 η 较低。

能量门限驱动的簇头轮换算法如 EDAC, EDCR 等依据节点的剩余能量动态计算触发簇头轮换的能量阈值, $E_{th} = p \cdot E_{res}$, 其中 $p \in [0,1]$, 为预设值。采用这种方法, 随着节点剩余能量的降低, 簇头轮换会越来越频繁, 在网络平均能量较低时, 节点的剩余能量大量消耗在了频繁的轮换中而非数据传输中, 即节点能量的效率 η 降低。

对于分簇的网络, 若每个节点只担当一次簇头, 则网络总的簇头轮换次数最少, 消耗在簇头轮换上的能量最小^[8], 而为达到此目标, 需要分析节点触发簇头轮换的最佳时机, 以下以簇为单位分析网络的能耗情况。

参考文献[11]的能量模型, 节点的能耗可分为数据发送和接收能耗两部分, 有

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\text{recv}} &= \varepsilon_{\text{elec}} k \\ \varepsilon_{\text{send}} &= \varepsilon_{\text{elec}} k + \varepsilon_{\text{amp}} r^\alpha k \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 $\varepsilon_{\text{elec}}$ 为电路能耗, ε_{amp} 为射频增益, r 为通信距离, α 为信道衰减因子, 一般取 $2 \sim 4$ 。

设网络中的各节点周期性的发送数据, 每轮数据上报过程中, 节点发送 k bit 数据至其簇头节点, 簇头做一定的数据融合后, 发送至 Sink, 定义此过程的网络能耗为 ε , 定义 ε_v 为网络中所有簇的簇内数据收集能耗, ε_c 为所有数据在簇头处理后上传至 Sink 的能耗, 则有^[9]

$$\begin{aligned} E[\varepsilon_v | M = n] &= np \cdot E[N_v | M = n] (E_{\text{Tx}}(k, r) + E_{\text{Rx}}(k)) \\ &= n(1-p)k(2\varepsilon_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{amp}} r^\alpha) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} E[\varepsilon_c | M = n] &= np \frac{0.765a}{mR} (E_{\text{Tx}}(k', R) + E_{\text{Rx}}(k')) \\ &= \frac{0.765npa}{mR} k' (2\varepsilon_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{amp}} R^\alpha) \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中 $k' = \beta k$, β 为簇头的的数据融合系数, m 为簇头间密度的修正参数, 一般取 $r < mE[R] < 3r$ 。则可得网络总能耗 ε 为

$$\begin{aligned} E[\varepsilon] &= E[\varepsilon_v | M = n] + E[\varepsilon_c | M = n] \\ &= n(1-p)k(2\varepsilon_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{amp}} r^\alpha) \\ &\quad + \frac{0.765npa}{mR} \beta k (2\varepsilon_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{amp}} R^\alpha) \end{aligned} \quad (7)$$

因此, 可计算得网络支持的数据上报轮数为

$$\bar{T} = (n \cdot E_0) / E[\varepsilon] = E_0 \left/ \left[(1-p)k(2\varepsilon_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{amp}}r^\alpha) + \frac{0.765pa}{mR} \beta k(2\varepsilon_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{amp}}R^\alpha) \right] \right. \quad (8)$$

此为网络生存时间的上限。

若以簇为单位考虑能耗, 设在每一轮数据收集过程中, 簇头节点能耗为 E_{CH} , 簇成员节点能耗为 E_{CM} , 则有

$$E_{\text{CM}} = k(\varepsilon_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{amp}}r^\alpha) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} E_{\text{CH}} &= E_{\text{CH_intra}} + E_{\text{CH_inter}} \\ &= \left[k\varepsilon_{\text{elec}} + \beta k(\varepsilon_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{amp}}R^\alpha) \right] \frac{1-p}{p} + (2\varepsilon_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{amp}}R^\alpha)\kappa \end{aligned} \quad (10)$$

式中 κ 表示簇头承担的簇间数据转发量, 是一个变量。

基于平衡网络能耗的考虑, 簇内每个节点都需要担当一定时间的簇头, 假设簇内节点 i 担当簇头的的数据收集轮数为 t_i , $i = 1, 2, \dots, l$, l 为簇内节点数, 则在网络的运行过程中节点 i 的总能耗 $(E_{\text{used}})_i$ 可表示为

$$\begin{aligned} (E_{\text{used}})_i &= E_0 - (E_{\text{res}})_i = (E_{\text{CH}})_i t_i + E_{\text{CM}} \sum_{j=1, j \neq i}^l t_j \\ &= [(E_{\text{CH}})_i - E_{\text{CM}}] t_i + E_{\text{CM}} \bar{T} \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $(E_{\text{res}})_i$ 表示网络寿命结束时节点 i 的剩余能量, $0 \leq (E_{\text{res}})_i < (E_{\text{CH}})_i$, 则节点担当簇头的时间可表示为

$$t_i = \frac{E_0 - (E_{\text{res}})_i - E_{\text{CM}} \bar{T}}{(E_{\text{CH}})_i - E_{\text{CM}}} \quad (12)$$

可得节点触发簇头轮换的能量阈值为

$$E_{\text{th}} = |E_{\text{cur}} - (E_{\text{CH}})_i t_i|_{\text{max}} = E_{\text{cur}} - \frac{(E_0 - (E_{\text{CH}})_i - E_{\text{CM}} \bar{T})}{1 - E_{\text{CM}} / (E_{\text{CH}})_i} \quad (13)$$

3 算法描述

在这一节具体描述簇拓扑建立与簇头轮换算法的实现步骤。

为了保证每个节点都能顺利入网, 需要保证 CH 具有一定的密度, 可通过调整簇头竞争时的发射功率及成簇时的发射功率来达到^[12]。

算法包括 3 个阶段: 初始化成簇阶段、数据收集阶段与簇头轮换与拓扑重建阶段。

(1)网络初始化成簇阶段 网络初始化后, 通过分布式竞争方式选取第 1 轮的簇头集合。簇头选举成功后, 周期性地广播 Beacon 帧, 用于簇内时间同步、簇成员时隙分配、备份 CH 节点通知等, Beacon 的帧结构如图 2 所示。非簇头节点持续侦听信道, 在接受到簇头的 Beacon 帧后, 置自己为“准簇成员(PreCM)”, 向信号强度最高的簇头发送入网申请消息 MSG_JOIN_REQ, 簇头节点判断自身簇状况, 若满员, 回复入网确认消息 MSG_JOIN_ACK, 并在下一个 Beacon 帧中为其分配时隙, 否则回复拒绝消息 MSG_JOIN_DENY。准簇成员向邻居簇头持续发送入网申请直至成功入簇, 置自身状态为“簇成员(CM)”。在节点入网前, 采用 CSMA 的 MAC 层协议, 而入网后则为 TDMA, 遵循其簇

Beacon Frame

OCT:1	5	2	5	5
Frame Control	SeqNum&Addr	SuperFrame Specification	Related Clock	FCS
MHR		MAC Payload		MFR

SuperFrame Specification

BIT:0-3	4	5	6-7	8-15
Beacon Order	EnrRpt Flag	BackupCH Enable Flag	reserved	BackupCH ID

图 2 Beacon 帧的结构示意图

头的时序调度。

(2)网络正常数据收集阶段 节点的正常工作时间以超帧为单位, 每个超帧周期可分为簇内通信时段与簇间通信时段。CH 节点在每个超帧的起始在簇内广播 Beacon 帧以维护 TDMA 的时序。在此阶段, CH 收集其簇成员发送的数据, 做一定的处理(数据融合)后, 以多跳方式发送至 Sink, 同时, 需要为簇头轮换做准备工作, 包括选择下任 CH (backupCH), 计算轮换的能量阈值等。

(a)CH 需要收集簇成员的能量信息以选择合适的 BackupCH: CH 节点周期性地将其 Beacon 帧的 EnrRpt 域置位, 用以通知簇成员节点发送其能量信息, 簇成员节点在收到通知后发送包含其当前能量值的 MSG_ENR_RPT 消息, CH 选择其中最高者作为 backupCH。

(b)CH 需要收集其能量消耗信息以计算自己的轮换门限: CH 通过对若干轮数据收集的能耗统计来估计节点担当 CH 时的能量消耗速率 $(E_{\text{CH}})_i$, 依式(13)计算轮换的能量阈值。

(3)簇头轮换与拓扑重建阶段 网络簇头轮换与拓扑重建过程的触发包括两种情况: CH 节点主动发起轮换过程或者 CM 检测到 CH 失效。

(a)CH 主动发起簇头轮换过程: 若 CH 检测到自身能量低于轮换的能量阈值, 则在簇内广播 MSG_CLUSTER_REBUILD 消息, 改变自身身份为“未定(UN)”, 各 CM 节点接收到该消息后, 若为 backupCH, 则置自身为 CH, 并广播自身的 Beacon 帧, 否则, 置自身身份为 UN, 重新侦听信道, 准备入网。

(b)CM 检测到 CH 失效: CM 节点连续 N 个周期未收到 CH 的 Beacon 帧, 则认为 CH 失效, 若节点为 backupCH, 则置自身为 CH, 在簇内广播 MSG_CLUSTER_REBUILD 消息, 启动拓扑重建进程, 并开始广播自身 Beacon 帧, 若为普通 CM, 则置自身为 UN, 重新侦听信道, 准备入网。

簇头轮换与拓扑重建的流程如图 3 所示。

4 仿真结果

4.1 仿真场景设置

本文采用网络仿真软件 QualNet v4.0 搭建仿真平台, 其前身为 GloMoSim, 具有仿真速度快、支持的仿真规模大等

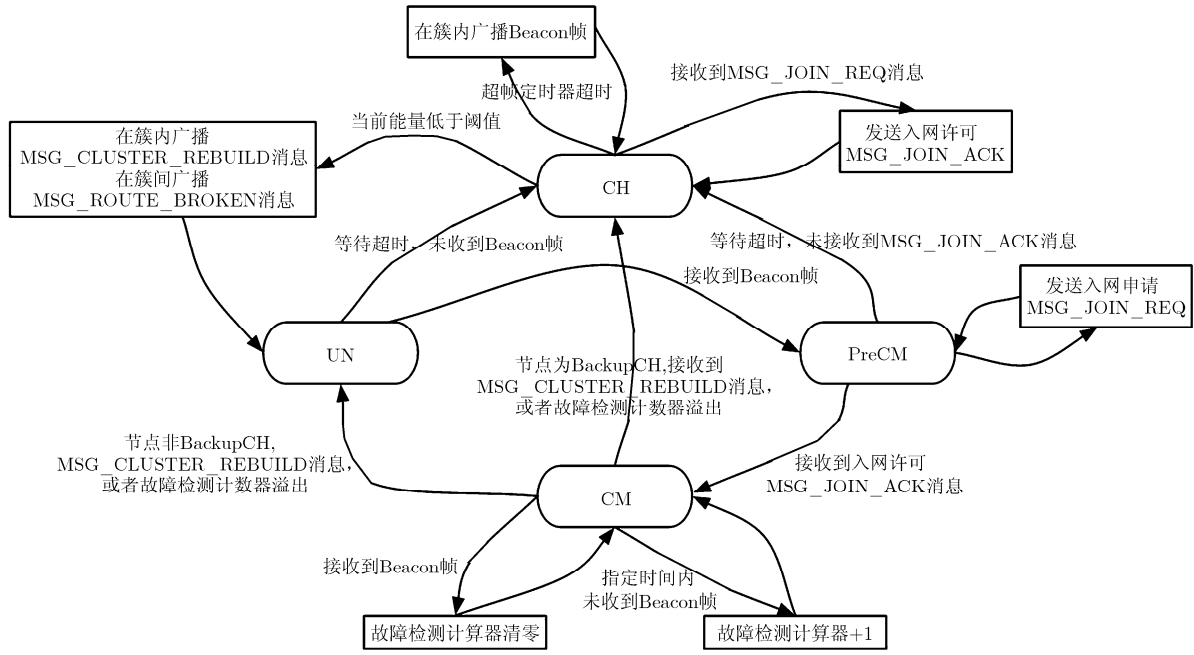


图 3 簇头轮换过程的状态转换图

特点。

设置仿真区域为 300m×300m 的正方形区域，在其中随机布设 100 个节点，数据收集节点 Sink 位于场景的中心位置。在 QualNet 中设置物理层采用 802.15.4 协议，双径模型，理想无衰落信道；MAC 层采用 CSMA 协议；每个节点以 $\lambda = 50\text{bit/s}$ 的 Poisson 分布生成数据，每个数据收集轮时间为 30s，节点的能耗模型设计基于 CC1100 平台，节点的初始能量设为 5J。

4.2 仿真结果与分析

由于网络中簇头以多跳方式传送数据至 Sink，且实际分簇算法获得的簇规模不等，故每个簇头的能耗速率不尽相同。图 4 为网络中节点(簇头与簇成员)平均每轮的能量消耗情况(单位: J)，可见，簇头节点的能量消耗远高于簇成员节点，且簇头之间能耗速率各不相同，因此，如 LEACH 等时间驱动的轮换策略难以获得优化结果，采用能量驱动是较好的选择。

对比 LEACH, EDAC, ACRA 算法及理论计算下网络的生存时间，当网络中簇规模增长的情况下，网络生存时间如图 5 所示，其中，EDAC 的轮换阈值参数 $p_{opt} = 0.644$ ， $(E_{th} = p \cdot E_{res})^{[7]}$ ，可见，依据簇头节点的实时负载动态计算能量阈值的 ACRA 算法可以获得最高的网络寿命，EDAC 次之，而 LEACH 消耗在簇头轮换上的能量较多而导致最终网络生存时间较低。

5 结束语

本文分析了分簇无线传感网中能量驱动的簇头轮换策略，给出了一种基于簇头节点实时负载估计其启动轮换的能量阈值的方法，并提供一种结合 MAC 层超帧调度的跨层的

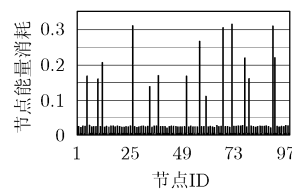


图 4 节点的能量消耗比较

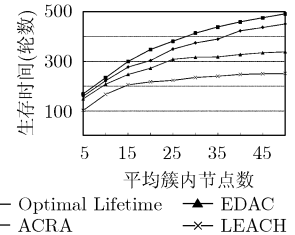


图 5 网络生存时间的比较

分簇与簇头轮换算法 ACRA，并通过仿真给出了其与现有算法如 LEACH、EDAC 等的性能比较，结果表明，ACRA 算法在尽量减少簇头轮换次数的基础上，使得节点的能量利用效率更高，从而延长了网络生存时间。

参考文献

- [1] Ahmed A and Mohamed Y. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks. *Comput. Commun.*, 2007, 30(14-15): 2826-2841.
- [2] Heinzelman W R, Chandrakasan A, and Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Hawaii, 2000: 10-15.
- [3] Younis O and 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.
- [4] Chan H and Perrig A. ACE: An Emergent Algorithm for Highly Uniform Cluster Formation. in *Wireless Sensor Networks: First European Workshop, EWSN 2004*, Berlin,

- 2004.
- [5] Wang Y, Zhao Q, and Zheng D. Energy-driven adaptive clustering data collection protocol in wireless sensor networks. In International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation, Chengdu, 2004: 599-604.
- [6] Gamwarige S and Kulasekera E. An algorithm for energy driven cluster head rotation in a distributed wireless sensor network. In Proceedings of the International Conference on Information and Automation(ICIA2005), Hong Kong, 2005: 354-359.
- [7] Gamwarige S and Kulasekera C. Optimization of cluster head rotation in energy constrained wireless sensor networks. In IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks,WOCN'07, Singapore, 2007: 1-5.
- [8] Wu Y, Chen Z, and Jing Q, *et al.* LENO: LEast rotation near-optimal cluster head rotation strategy in wireless sensor networks. In 21st International Conference on Advanced Networking and Applications, AINA'07, Canada, 2007: 195-201.
- [9] Su H and Zhang X. Energy-efficient clustering system model and reconfiguration schemes for wireless sensor networks. In Proc. 40th Conference on Information Sciences and Systems (CISS 2006), Princeton, 2006: 99-104.
- [10] Foss S G and Zuyev S A. On a Voronoi Aggregative Process Related to a Bivariate Poisson Process. *Advances in Applied Probability*, 1996, 28(4): 965-981.
- [11] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, and Balakrishnan H, *et al.* An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670.
- [12] Misra R and Mandal C. ClusterHead Rotation via Domatic Partition in Self-Organizing Sensor Networks. In 2nd International Conference on Communication Systems Software and Middleware, COMSWARE 2007, Bangalore, 2007: 1-7.
- 黄河清: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络.
姚道远: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络.
刘海涛: 男, 1968 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为无线通信、无线传感器网络.