

基于博弈的大规模无线传感器网络分簇算法

张玺栋^{*①②} 康桂霞^① 张平^① 张恒^③

^①(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室 北京 100876)

^②(陆军航空兵学院机载设备系 北京 101123)

^③(中国电子设备系统工程公司网管中心 北京 100840)

摘要:合理的分簇方式能够有效延长大规模无线传感器网络(LS-WSN)的寿命,从而降低其部署使用成本。当前很多WSN分簇的研究均假设节点均匀分布,这与实际应用中的大规模WSN有所差距。该文针对节点非均匀分布的大规模WSN,提出了一种分簇算法。该算法在基于蜂窝结构虚拟网格的位置分簇之后,引入博弈理论设计分簇调整流程,使网络达到各簇中节点数尽量均匀的分簇状态。理论分析和仿真结果证明,通过该方法进行分簇,可以有效均衡各个簇中的节点数,从而延长网络有效寿命。

关键词: 泛在网络; 无线传感器网络; 分簇; 节能; 博弈

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)10-2516-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00239

Game Theoretic Clustering Algorithm for Large Scale WSN

Zhang Xi-dong^{①②} Kang Gui-xia^① Zhang Ping^① Zhang Heng^③

^①(Key Laboratory of Universal Wireless Communication, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Communication, Beijing 100876, China)

^②(Department of Aero Equipment, Institute of Army Aviation, Beijing 101123, China)

^③(China Electric Equipment System Engineering Corporation Network Management Center, Beijing 100840, China)

Abstract: Reasonable clustering algorithm can prolong the Large Scale Wireless Sensor Network (LS-WSN) lifetime, so as to reduce the cost of using it. Up to now, most research on WSN clustering assumes that the nodes in WSN are uniformly distributed. But this assumption is different from practical LS-WSN. In this paper, a novel clustering algorithm is proposed, which is suitable for the non-uniformly distributed LS-WSNs. In the proposed algorithm, LS-WSN is clustered according to the location aware clustering method, which based on the hexagons virtual grid, then the clusters are adjusted following a game theoretic adjustment process. After the algorithm, the numbers of nodes in each cluster is nearly similar. Theoretical analysis and simulation results show that the proposed algorithm can effectively balance the number of nodes in each cluster, thus prolonging the effective lifetime of WSN.

Key words: Ubiquitous network; Wireless Sensor Network (WSN); Clustering; Power saving; Game theory

1 引言

无线传感器网络(WSN)是能够进行环境感知的末梢网络,是实现泛在无线通信目标的重要网络基础设施。适当的网络结构能够有效提高WSN能效,延长网络寿命,从而降低WSN的部署使用成本。研究证明,分簇式的拓扑结构比较适合大规模WSN(Large Scale WSN, LS-WSN),因为簇头节点

(CH)可进行部分数据融合,减少数据传输量;成员节点大部分时间可以休眠以节省能量;成员节点无须维护复杂的路由信息,减少网络中路由控制信息的数量,从而延长网络寿命^[1]。基于位置的分簇算法因为路由处理方便,实现较简单,控制开销小等特点,受到越来越多关注。目前节点定位算法研究比较充分^[2],为基于位置的分簇算法提供了基础。研究表明,采用蜂窝结构可以提升位置分簇的性能^[3]。文献[4]提出了按照固定大小的蜂窝结构对WSN进行分簇的方法,该算法中选择最接近理想位置即近六边形质心的节点作为簇头,形成较理想的分簇结构。该方法要求周期性进行重新分簇,以保

2011-03-16 收到, 2011-07-01 改回

国家自然科学基金(2008BAH24B02), 国家 863 计划项目(2009AA02Z412)和国际科技合作项目(2010DFA11590)资助课题

*通信作者: 张玺栋 science_storm@163.com

证簇头尽量接近六边形质心，这将带来较多的额外开销。

文献[4]中假设节点分布完全均匀，这在节点数较少且部署方便的 WSN 应用中可人为实现。但是在诸如野外环境监测、战场态势感知等 LS-WSN 应用中，需要将大量节点通过飞机布撒、炮弹散布等形式部署。在这些应用下，根据中心极限定理可以证明，节点的空间分布呈高斯形式^[5]。这时若按照大小固定的虚拟单元格对 WSN 进行分簇，各个簇内节点数目会很很不均衡，导致簇的寿命不均衡。因此，有必要设计合理的分簇算法，一方面使分簇保持稳定，以充分利用基于位置的分簇算法在路由处理和um控制开销等方面的优势，提高网络能效；另一方面使各簇的寿命尽量均衡，从而增加网络整体的有效工作时间。

本文提出一种针对节点呈非均匀分布的 LS-WSN 分簇算法。该算法首先按照蜂窝结构对 LS-WSN 进行基于位置的分簇，然后通过博弈算法实现簇的调整，均衡各簇中的节点数，从而均衡各簇的寿命。本文后续内容安排如下：第 2 节首先对分簇算法的优化目标进行分析，然后介绍基于博弈的分簇算法的基本思想并进行理论分析，第 3 节通过仿真分析给出该算法与传统算法的性能比较，第 4 节进行总结。

2 基于博弈的分簇算法

2.1 优化目标分析

本文研究对象是部署在 2 维平面一定范围内，网络节点位置固定的 WSN。网络节点通过电池供电，有休眠、活动、数据传输和数据接收几种状态。在休眠状态下，节点无线通信模块关闭，能耗最小；在活动状态下，节点无线通信模块打开，可随时进行数据收发；在数据传输和数据接收状态下，节点无线通信模块分别进行数据的传输和接收。假设各节点能够理想同步。节点部署完成后，首先进行网络初始化，完成网络的自组织，之后网络开始稳定工作。在初始化阶段，完成节点定位、分簇、路由建立等操作。工作阶段划分为若干周期。该阶段中分簇保持不变，每个周期中，各节点按预设的算法进行一轮观测数据的采集和传递。按照需要，在若干周期后进行簇头重选。由于数据传输可以采用协同传输的方式，故对簇头节点的位置要求可以降低，在本研究中，在簇头重选时不要求簇头位于簇的中心。簇头选择算法和协同节点选择方法目前有很多专门的研究，如文献[6,7]等，故在本研究所提的流程中可使用已有算法。

对分簇的 LS-WSN，当各簇中的节点数相差较多时，节点数较少的簇会提前死亡，此时网络覆盖度和连通度会降低，网络的利用价值减小。对“由节点部署到第 1 个节点死亡的时间长度^[1]”这一网络寿命的定义进行改进，得到更适用于分簇的 LS-WSN 网络寿命的定义：

定义 1 分簇 LS-WSN 有效寿命，即网络由部署到网络中第 1 个簇死亡的时间长度。

由定义 1 可知，网络有效寿命取决于网络中绝对寿命最短的簇。故网络有效寿命的最大化问题可表示为 $\max\{\min[L_i]\}$ ，其中 $[L_i]$ 为各个簇的寿命组成的数组。

由于网络传输能耗与节点携带的能量相比，数值很小，故簇的绝对寿命取决于成员节点数，故问题转化为 $\max\{\min[n_i]\}$ ，其中 $[n_i]$ 为各个簇中的节点数组成的数组。又易证明， $\max\{\min[n_i]\}$ 与 $\min\{D[n_i]\}$ 一致，其中 $D[n_i] = \sum_{j=1}^m (n_j - N/m)^2$ 为数组 $[n_i]$ 的方差， N 为节点总数， m 为簇的总数。由于 $D[n_i] \geq 0$ ，故当 $D[n_i]=0$ ，即 $n_i = E[n_i]$ 时有 $\min[n_i]$ 最大，可知当所有簇中的节点数相同时，能够使网络有效寿命最大。但由于节点通信距离有限，不可能实现任意节点加入任意簇，从而保证所有簇中的节点数都达到一致，所以各簇中的节点数完全相同只是一种理想情况。因此，分簇算法优化目标确定为：使所有簇中节点数目尽量均衡。

2.2 算法设计

运用该分簇算法的 LS-WSN 工作时序如下：节点部署完成后，首先进行初始化，完成网络的自组织，之后网络开始稳定工作。在初始化阶段，完成节点定位、分簇操作、路由建立等操作。在工作阶段，分簇保持不变，故路由建立后也无需变化。工作阶段划分为若干周期，每个周期中，各节点按预设的算法进行一轮观测数据的采集和传递。按照需要，在若干周期后根据能量剩余情况进行簇头重选。本文所提算法应用于分簇操作中。分簇操作由初始分簇和分簇调整两个步骤组成。在初始分簇中，节点定位完成后，将观测区域进行基于蜂窝结构虚拟网格的划分，然后根据各节点的位置判断出其所属的网格区域，同一个网格区域的节点形成一个簇，最接近六边形质心的节点当选为该簇的簇头节点，完成初始分簇。其中蜂窝结构虚拟网络的确定和簇头节点选择的方法可参考文献[4]。分簇调整阶段，通过调整算法来实现均衡各簇中节点数的目标。分簇调整算法的任务是在初始分簇的基础上形成新的分簇结构，保证簇中节点数目尽量均衡。同时满足 3 个约束条件：(a)加入某个簇的节点不能超出该簇

头的通信范围；(b)不应出现这种情况下：一个节点距离簇 CH A 较 CH B 更近而加入簇 B，同时另一个节点距离簇 CH B 较 CH A 更近而加入簇 A；(c) 每一个节点都属于某一个簇。上述目标可表示为式(1)的优化问题：

$$\min f(X) = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^N x_{ij} - \frac{N}{m} \right)^2$$

$$\text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} d_{ij} \leq R_{\max}, \forall x_{ij} = 1 \\ d_{st} \leq d_{sj}, d_{ij} \leq d_{sj}, \forall x_{ij} = 1 \text{ and } x_{st} = 1 \\ \sum_{j=1}^m x_{ij} = 1 \end{array} \right. \quad (1)$$

其中 R_{\max} 表示节点最远通信距离， d_{ij} 表示节点 i 到簇 j 的簇头(CH $_j$)的距离， x_{ij} 表示节点 i 是否属于簇 j ，若属于，则 x_{ij} 为 1，否则为 0。则式(1)的解为节点归属关系矩阵 $\mathbf{X}=[\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N]^T$ ，其中 $\mathbf{X}_i=[x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}]$ 。

虽然决策变量 x_{ij} 的定义域和可行解集合是有限的，但采用常规的枚举法寻找解，需要考察的方案为 m^N 个，在节点数目较多的大规模 WSN 中，这种方法显然是不可接受的。可以证明式(1)是 NP-难问题^[8]，因此必须针对大规模 WSN 的特点寻找适宜的解决方法。本文引入博弈论的原理和思想，设计基于博弈的自适应分簇调整算法来实现分簇的均衡。

一般地，一个策略式博弈由 3 种要素组成：博弈参与者集合、参与者的策略空间、参与者的收益函数。博弈主体具备经济理性，始终追求自身收益的最大化。

定义各节点尝试重新分簇的过程为一轮博弈 G ，该博弈的参与者集合为 $i \in \Gamma, \Gamma = \{1, 2, \dots, N\}$ ，与 WSN 中的节点集合一致； G 中每个参与者的策略空间 $\mathbf{X}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}]$ ， $i \in \Gamma$ 为有限纯策略，由参与者对加入簇的 m 种不同选择构成，当 i 选择加入簇 j 时，0/1 决策变量 x_{ij} 为 1，否则为 0。每个参与者的收益向量为 $\mathbf{u}_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]$ ， $i \in \Gamma$ ，由参与者所采取策略空间中的相应策略后的收益组成。博弈参与者的收益计算方法如下：定义 G 中一个参与者 i 加入簇 j 时的收益由容量收益 U_{c_ij} 和距离收益 U_{d_ij} 两部分构成，见式(2)。

$$U_{c_ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^N x_{kj} - \frac{N}{m}, & d_{ij} \leq R_{\max} \\ -Q, & d_{ij} > R_{\max} \end{cases} \quad U_{d_ij} = Q - d_{ij} \quad (2)$$

其中 Q 为正常数，且 $Q \gg N/m$ 。这两种收益中，容量收益对节点是否调整所处分簇起决定性的作用。基于博弈的自适应分簇调整算法的状态流程图如图 1 所示。初始分簇完成后，各簇头广播本簇中的节点数。每个节点根据当前所属簇的情况求出自身当前容量收益 $U_{c_i_now}$ 。节点 i 接收到多个簇头广播的节点数，并根据收到的节点数，计算出自己加入各个簇后可能获得的容量收益 $[U_{c_ij}]$ ，这组收益中的最大值为节点 i 采用最优策略时的收益，称为期望容量收益 $U_{c_i_exp} = \max[U_{c_ij}]$ ，使节点 i 获得期望容量收益的簇为 i 的期望簇。若所有节点中，没有 $U_{c_i_now} < U_{c_i_exp}$ 的情况，认为博弈达到均衡，算法结束。否则，找到 $U_{c_i_now} < U_{c_i_exp}$ 的 n_1 个节点中 $U_{c_i_exp}$ 最大的 n_2 个。 n_2 个节点各自根据自身与各自期望簇的簇头的距离，求出相应的距离收益 $U_{d_i_exp}$ 。之后，选择 n_2 个节点中 $U_{d_i_exp}$ 最大的一个节点 I (如果有多个节点的 $U_{d_i_exp}$ 相同且都为最大值，则随机选择其中一个作为 I)，令其加入期望簇。各簇头节点重新计算簇中节点数并广播，开始新一轮博弈。算法结束时，各节点与各簇的归属关系矩阵即为式(1)的解 \mathbf{X} 。

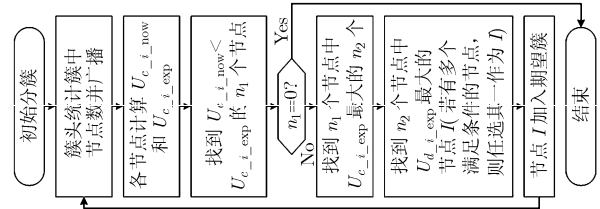


图 1 分簇调整算法流程图

2.3 算法分析

(1)纳什均衡存在性证明 根据纳什均衡存在性定理^[9]，在一个有 n 个博弈参与者的博弈 G 中，如果 n 有限，且参与者的策略集都是有限集，则该博弈至少存在一个纳什均衡解，但可能包含混合策略。由于本算法中定义的博弈 G 是有限纯策略博弈，因此存在纯策略纳什均衡解 \mathbf{X} 。 证毕

(2)博弈收敛性证明 设所有节点在均衡状态下相应的分簇情况组成一个集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ ，其中 $s_i, i \in \Gamma$ 为节点 i 归属簇的值。从 2.2 节可知，本算法可以看作是在策略组合空间里的纳什均衡状态组成的子集中的随机转移过程。设纳什均衡状态组成的状态空间为 Ω^* ，易知 Ω^* 是有限集。由于一个纳什均衡解建立在前一个纳什均衡解的基础上，即将来状态的条件概率分布仅依赖于当前状

态，因此有： $P(S_{r+1} = B | S_r = A, S_{r-1} = C, \dots, S_1 = D) = P(S_{r+1} = B | S_r = A) = p_{AB}$ ， $A, B, C, D \in \Omega^*$ ， r 为博弈演化次数。由于 p_{AB} 与 r 无关，因此算法构成一个有限状态的齐次马尔科夫链。设 Ω^{**} 为所有最优纳什均衡状态的集合，由算法的演化过程可知 $\Omega^{**} \subset \Omega^*$ ，且 $\forall A \in \Omega^{**}, B \notin \Omega^{**}$ 有 $p_{AB} = 0$ ，因此 Ω^{**} 为闭集，又 $\forall A \notin \Omega^{**}, B \in \Omega^{**}$ ，有 $p_{AB} > 0$ ，因此 Ω^{**} 中的状态为常返状态， $\Omega' = \Omega^* - \Omega^{**}$ 中的状态为非常返状态。

由于算法存在纳什均衡解(由算法博弈均衡存在性证明可知)，因此在一个回合结束时，纳什均衡解 \mathbf{X} 对应的系统状态 $S^* \in \Omega^*$ 。若 $S^* \in \Omega'$ ，则有限齐次马尔科夫链从任意非常返状态出发以概率 1 转移到 Ω^{**} 中；若 $S^* \in \Omega^{**}$ ，则已找到最优纳什均衡解。

证毕

(3)算法有效性证明 博弈主体始终追求自身收益的最大化，因此主体在博弈中将总以当前状态下能获得的最大收益(最大收益通过比较主体 i 所有可能策略在当前状态下对应收益求得)作为期望收益，能获得最大收益的策略即为最优策略。

考虑网络中一个节点 i 在簇 A ，簇 B 的簇头的通信距离内，当前属于簇 A 。簇 A ，簇 B 中当前节点数为 n_A, n_B 。此时 i 求出自己处于簇 A ，簇 B 时的容量收益： $U_{c_iA} = 1/n_A, U_{c_iB} = 1/n'_B$ ，其中 $n'_B = n_B + 1$ ，表示节点 i 加入簇 B 后， B 中的节点数。按照所设计的算法， i 换簇的条件为 $U_{c_iA} < U_{c_iB}$ ，可推得 $n_A > n'_B = n_B + 1$ 。又 $n'_A = n_A - 1$ ，表示节点 i 离开簇 A 后 A 中的节点数，此时有

$$\begin{aligned} D[n_i] - D[n'_i] &= \frac{n_B + n'_B - n_A + n'_A}{m} \\ &= \frac{2(n_B - n_A + 1)}{m} < 0 \end{aligned} \quad (3)$$

故算法的执行可保证方差减小。由于会获得 $-Q$ 的负收益，参与者不会选择 $d_{ij} > R_{\max}$ 的簇头，约束条件(a)满足；当某一状态下多个参与者期望加入的簇相同时，只有距离该簇簇头最近的参与者可以加入，保证约束条件(b)满足。由于只有确定了期望簇后，节点才会执行换簇操作，故不会出现经过变换后节点不属于任何簇的情况出现，约束条件(c)满足。

由于在满足 $d_{ij} \leq R_{\max}$ 的情况下，参与者获得的容量收益随着簇中的节点数增加而减少，因此博弈主体趋向于选择节点数少的簇，这样在不均衡的情况存在时，参与者总有重选簇的动力。且已经证明该博弈总能收敛并达到均衡状态。综上，算法有效性得证。

(4)算法复杂度分析 令复杂度上限用符号 $\Omega(\cdot)$ 表示，下限用 $O(\cdot)$ 表示。对于簇头节点，最坏情况是该簇头能接收到监测区域内所有节点的信号，而且每个节点都需要重新进行分簇，这时簇头需要进行簇成员统计的运算的频度为 $g(N) = N \times N = N^2$ ，故有 $\Omega(N^2)$ ；最佳情况是该簇头仅能接收到本簇的成员节点的信号，且系统中各簇节点数均衡，这时簇头需要进行簇成员统计的运算的频度为 $g(N) = N/m$ ，故有 $O(N)$ 。对于簇成员节点，最坏情况是所有节点都需要重新分簇，且该节点在所有其他节点都重新进行过分簇之后才确定自身分簇状况，该节点需要进行自身收益计算的频度为 $g(m) = 2m \times N$ ，故有 $\Omega(mN)$ ；最佳情况是系统中各簇节点数均衡，该节点进行自身收益计算的频度为 $f(m) = 2m$ ，故有 $O(m)$ 。可见，算法复杂度与节点数和簇的个数有关，且最大复杂度为 N^2 量级，与常规枚举法的 m^N 量级相比，复杂度大大降低。

3 仿真与讨论

考虑一个LS-WSN，监测区域范围为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ ，节点数为400。节点在观测区域内呈正态分布。设所有节点同构，且保持分组、载波和符号同步。对监测区域进行基于蜂窝结构虚拟网络的划分，相邻网格的中心点距离为 10 m 。设周期长度为 10 s 。节点硬件以Corssbow公司的mica2节点为模型，每个节点由两节AA电池供电，总能量储备 $P_{\text{node}} = 1200 \text{ mAh}$ ，接收状态电流为 16 mA ，活动而无数据收发状态电流为 $8 \text{ mA}^{[10]}$ 。设置节点发送状态最大电流为 33 mA 。设节点最大通信距离为 15 m 。仿真使用数学软件matlab。

图2给出了将观测区域中的WSN通过固定大小的蜂窝结构分簇方法进行分簇的情况，图3给出了通过本文所提的基于博弈的分簇方法进行分簇后的网络状况。使用固定大小的蜂窝结构分簇方法以及基于博弈的分簇方法进行分簇后，具体各个簇中的节点数目情况在图4中进行了比较。可以看出，通过基于博弈的分簇方法进行分簇，各簇中节点数比较接近，且通过计算可知，使用固定大小的蜂窝结构分簇方法时，各簇中节点数的方差为247.6，而使用基于博弈的分簇方法进行分簇，各簇中节点数的方差为4.8。

图5比较了使用基于蜂窝结构进行的分簇方法与本文所提方法进行分簇时，网络有效寿命的差别。可以看出，使用固定大小的蜂窝结构分簇方法进行分簇后，经过长度为 L_1 的一段时间，网络中已经有

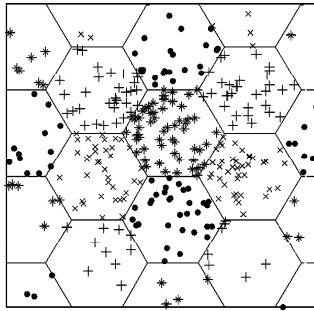


图 2 基于六边形虚拟网格的分簇结果示意图

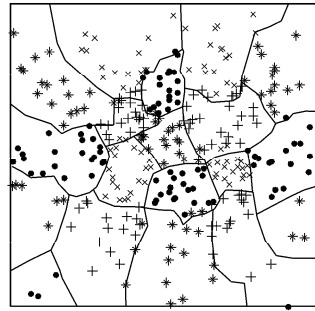


图 3 基于博弈的分簇结果示意图

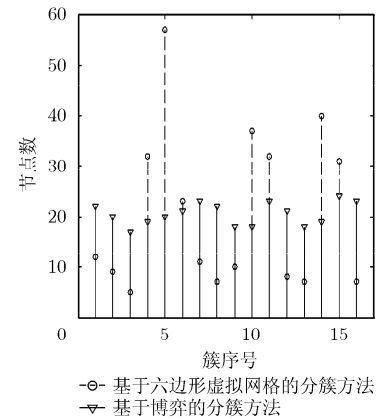


图 4 使用两种分簇方法后各簇中节点数目比较

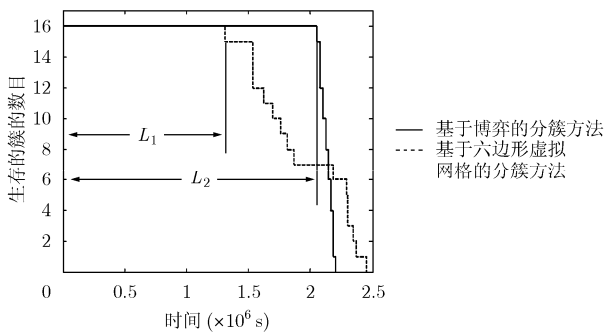


图 5 使用两种分簇方法后网络有效寿命比较

簇死亡, 则采用这种方法时网络的有效寿命为 L_1 。而通过基于博弈的分簇方法进行分簇后, 由于各簇中节点数较均匀, 经过长度为 L_2 的一段时间后, 网络中开始有簇死亡, 则网络有效寿命为 L_2 。由图 5 可见, $L_2 > L_1$ 。

4 结束语

本文提出了一种适用于节点非均匀分布的 LS-WSN 的分簇算法。该算法在基于蜂窝结构虚拟网格的位置分簇之后, 通过博弈理论设计分簇调整流程, 使各簇中节点数目尽量均衡, 从而提高能效, 并延长网络有效寿命。理论分析和仿真验证表明, 该方法能有效均衡各簇中的节点数, 实现延长网络有效寿命的目标。在下一步工作中, 可以在这种分簇方法的基础上, 开展动态调整节点发送功率的研究, 从而进一步提高网络能效, 延长网络寿命。

参考文献

- [1] Younis O, Krunz M, and Ramasubramanian S. Node clustering in wireless sensor networks: recent developments and deployment challenges [J]. *IEEE Network*, 2006, 20(3): 20-25.
- [2] Wang Fu-bao, Shi Long, and Ren Feng-yuan. Self-localization systems and algorithms for wireless sensor

networks [J]. *Journal of Software*, 2005, 16(5): 857-868.

- [3] Wang Z and Zhang J. Energy efficiency of two virtual infrastructures for MANETs [C]. 24th IEEE International Performance, Computing and Communications Conference, 2005, IPCCC 2005, Phoenix, Arizona, USA, 2005: 547-552.
- [4] Tian Wei and Yang Zhen. New location aware clustering algorithm [J]. *Journal on Communications*, 2010, 31(3): 25-30.
- [5] Ahmed M F A and Vorobyov S A. Collaborative beamforming for wireless sensor networks with Gaussian distributed sensor nodes [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(2): 638-643.
- [6] Du Xiang-dang, Li Yi-yang, and Shi Xiu-hua. Improved arithmetic in choice of head-node based on clustering of WSN [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, 21(7): 1202-1206.
- [7] 张余, 蔡跃明, 潘成康, 等. WSN 中一种能量有效的自适应协同节点选择方案[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(9): 2193-2198. Zhang Yu, Cai Yue-ming, Pan Cheng-kang, et al. An energy-efficient adaptive cooperative node selection scheme in WSN [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(9): 2193-2198.
- [8] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法(第 2 版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 28-48.
- [9] 谢识予, 经济博弈论(第 2 版) [M]. 上海: 复旦大学出版社, 2006: 106-109.
- [10] 6020-0042-07 Rev A. <http://www.xbow.com.cn/>, 2007.

张玺栋: 男, 1982 年生, 讲师, 博士生, 研究方向为移动泛在网络、WSN 高能效传输关键技术等。

康桂霞: 女, 1972 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信信道估计及传感器网络技术。

张平: 男, 1959 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为 3G 和 B3G 无线通信理论和技术研究。

张恒: 女, 1982 年生, 工程师, 博士, 研究方向为网络控制与管理。