

## WSN 中能量有效的分层协作覆盖模型\*

杨勇<sup>+</sup>, 夏士雄, 周勇

(中国矿业大学 计算机科学与技术学院, 江苏 徐州 221008)

### Energy Efficient Hierarchical Collaboration Coverage Model in Wireless Sensor Network

YANG Yong<sup>+</sup>, XIA Shi-Xiong, ZHOU Yong

(School of Computer Science and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

+ Corresponding author: E-mail: yangyong\_v@163.com

**Yang Y, Xia SX, Zhou Y. Energy efficient hierarchical collaboration coverage model in wireless sensor network. Journal of Software, 2012, 23(10): 2783-2794 (in Chinese).** <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4173.htm>

**Abstract:** Since the node's energy dissipation model is not taken in to account in the traditional coverage models, based on the collaboration coverage model, the energy efficient hierarchical collaboration coverage model is proposed, which can evenly balance the energy dissipation among different layers in the target monitor area. This paper solves two specific problems in the ant colony solution. They are a formula of heuristic factor calculating for the model and the upper and lower bounds of node numbers. Simulations in Matlab show that the proposed model is more suitable for practical deployment which can evidently prolong the network lifetime.

**Key words:** wireless sensor network; hierarchical collaboration coverage model; ant colony optimization; heuristic factor

**摘要:** 针对传统网络覆盖模型仅以区域覆盖率作为评价标准,而未考察不同覆盖模型下节点能量有效性问题,在协作覆盖模型的基础上,提出了能量有效的分层协作覆盖模型 EEHCCM(energy efficient hierarchical collaboration coverage model),并应用蚁群优化算法进行求解.该模型通过对目标区域进行分层,并优化各个层内的节点数目来实现节点能量的能耗均衡.提出了基于分层协作覆盖模型的启发式因子和全覆盖条件下节点数量的上下限的计算方法.通过 Matlab 仿真实验,其结果表明,应用 EEHCCM 模型实现目标区域节点的部署,在同等覆盖能力下,网络的生存时间可以得到较大的提升,与传统的覆盖算法相比,更适用于实际的节点部署.

**关键词:** 无线传感器网络;分层协作覆盖模型;蚁群优化;启发式因子

**中图法分类号:** TP393      **文献标识码:** A

无线传感器网络以其部署灵活、成本低廉的特点,在军事侦察、智能工业控制等领域得到了广泛的应用.网络覆盖是无线传感器网络对其目标监控区域探测性的一种度量,是无线传感器网络研究内容中的一个重要问题.WSN 的覆盖问题<sup>[1]</sup>可以看作是在节点能量、网络带宽、节点计算能力等资源受限的情况下,通过节点数目的优化配置、节点位置的选取和路由协议的选择等手段来实现资源的优化配置,使网络的服务质量得到提升.网络覆盖模型依赖于单点覆盖模型和节点位置分布.覆盖模型按照配置方式可以分为确定性覆盖模型和随机性覆盖模型.确定性覆盖模型的主要研究内容是根据预先设置的节点位置确定网络拓扑结构;随机性覆盖模

\* 基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20100095110003)

收稿时间: 2011-03-25; 修改时间: 2011-11-08; 定稿时间: 2011-12-31

型的研究内容是在节点随机分布且节点位置未知的情况下,完成对目标区域的覆盖.评价覆盖模型优劣的主要标准有网络对目标区域的覆盖程度、能量有效性、算法的精确性和网络拓扑的健壮性.

在无线传感器网络中,由于节点能量受限<sup>[2]</sup>、实际应用环境复杂而且多数情况下不允许对节点的电池进行更换,因此,最大限度地延长网络生存时间,成为无线传感器网络中重要的研究内容.

传统的覆盖模型<sup>[3]</sup>有布尔模型、一般覆盖模型、协作覆盖模型和概率覆盖模型等.Zhang 和 Jennifer 提出的布尔模型<sup>[4]</sup>较为简单,不能表达传感器的探测能力随距离增加而减小的特征;文献[5]提出的一般覆盖模型则仅考虑了单个传感器的覆盖能力;协作覆盖模型(collaboration coverage model)<sup>[6]</sup>和概率覆盖模型<sup>[7]</sup>虽然考虑到了多个传感器对覆盖的贡献,但却未从节点能耗的角度进行研究.

目前,对于能量有效的覆盖算法的研究是 WSN 覆盖领域的研究热点.其主要研究内容是,在保证传感器网络对目标区域具有一定覆盖能力的情况下,减少节点能量消耗.主要手段有:在节点数目确定的情况下优化网络拓扑,在节点冗余部署的情况下进行休眠调度,优化节点数目和节点位置,优化 sink 节点的位置等.目前,针对无线传感器网络中能量有效的覆盖研究多集中在前两个领域.

Ye 等人提出了一种自适应的节能调度方法 PEAS<sup>[8]</sup>,该算法通过优化节点的睡眠时间来达到节能的目的.节点之间通过发送 PROBE 和 REPLY 消息探测相邻区域内处于活动状态的节点数目,然后根据总探测率来自适应地调节自身的休眠时间.PEAS 适用于节点密集部署的应用中,通过休眠调度使得冗余节点处于低功耗的休眠模式,极大地节省了网络能量.但是 PEAS 的冗余发现机制需要节点间不断发送消息,这也使得节点的能耗增加,而且该算法会导致某些节点持续工作,出现节点过早死亡的情况.

Sanli 等人提出了能量有效的区分服务覆盖协议<sup>[9]</sup>,该协议针对不同类型的应用分别提出了基于邻居关系的 NCP 协议和基于网格划分的 GCP 协议,协议中引入了轮的划分,并根据节点的剩余能量来优先选择剩余能量较少的节点进入睡眠状态,但是,该协议的冗余发现机制需要物理定位设备或定位协议的支持.

文献[10]提出了高效节能的覆盖保持协议 EECCP,给出了节点感知半径服从正态分布且无需地理位置信息的节点冗余度计算模型.文献[11]提出了一种维持网络原有覆盖范围、连通性的分布式 Voronoi 覆盖控制算法,给出了一种能量有效的 Voronoi 调度规则.

Prab 等人提出了一种分布式六边形覆盖算法<sup>[12]</sup>,该算法通过选择最优的邻居节点来实现能量有效的网络覆盖.Sounak 等人提出了同构节点网络环境下的动态能量均衡休眠调度策略<sup>[13]</sup>,该策略通过节点剩余能量等 3 个因子来确定节点的休眠调度,进而达到节省能量的目的,但是该算法不支持多跳网络.Costa 等人提出了拓扑感知、节点拒绝的多路径选择算法<sup>[14]</sup>,该算法通过考察节点的覆盖能力,并通过多路径选择来平衡节点能耗.Martins 等人解决了有节点失效的情况下,区域覆盖的动态恢复<sup>[15]</sup>,提出了能量有效的动态覆盖算法 MGoDA.文献[16,17]在保证一定覆盖率的情况下,分别使用了蚁群算法和遗传算法对节点的休眠调度进行了优化.文献[18]提出了一种基于贪婪算法的最小覆盖集近似算法,该算法可以在线性时间内计算出最小覆盖集.即用最少的节点覆盖目标区域,从而让更多的节点进入休眠调度,达到降低节点能耗的目的.

文献[19]提出了一种能量有效的中继节点快速选择算法 EERNFS,在该算法中,节点在每个网络侦听/睡眠周期内以概率同步激活唤醒,从而达到降低节点能耗的目的.EERNFS 算法是以节点具有数据通信信道和侦听唤醒信道两条信道为前提的,节点以概率  $Q_i$  唤醒,无法保证监控区域的可靠覆盖.在  $Q_i$  计算公式中,参数  $\alpha$  和  $\beta$  的选取依赖于网络节点的分布均匀性和节点剩余能量的分布离散特征.

在多跳网络中,多数节点需要通过中继节点进行路由转发才能将数据发送到 sink 节点.中继节点除了要发送自身监测数据外,还需转发其他节点的监测数据,节点能量损耗较快.因此,在网络中处于不同位置的节点能量的损耗速度不尽相同,仅考虑覆盖率而忽视因节点能量损耗速率的差异,会使某些位置的节点较快地死亡,从而缩短整个网络的生存时间.

## 1 协作覆盖模型

2001 年,Seapahn 等人建立了协作覆盖模型(CCM)<sup>[6]</sup>,通过定义某一点的覆盖指标来反映网络在该点的覆盖

情况.覆盖指标定义为

$$I(p, K) = \sum_{k=1}^K S(p, s_k) \tag{1}$$

$$S(p, s_k) = \begin{cases} \frac{\alpha}{d(s^k, p)^\beta}, & d(s_k, p) \leq R_c \\ 0, & \text{other} \end{cases} \tag{2}$$

2007 年,杨等人在协作覆盖模型的基础上指出<sup>[20]</sup>,在保证区域被完全覆盖的条件下,最优的节点分布是:任意三点构成一个等边三角形,三角形的边长为  $\sqrt{3}R$  ( $R$  为节点的最大通信半径),所有节点呈蜂窝状覆盖目标区域.如图 1 所示,区域  $S$  被 14 个节点呈蜂窝状覆盖.

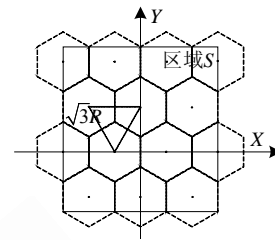


Fig.1 Collaboration coverage model  
图 1 协作覆盖模型

## 2 能量有效的分层协作覆盖模型

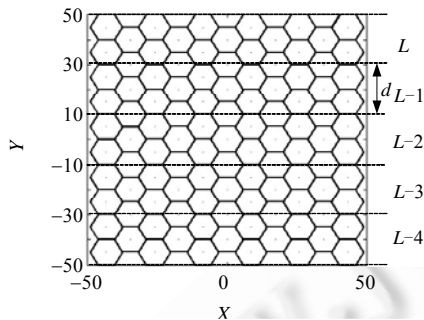


Fig.2 Hierarchical collaboration coverage model  
图 2 分层协作覆盖模型

为了表达目标区域的位置信息,对目标区域进行分层是一种简单而有效的方法.在一定的层次划分粒度下,同一层次中节点的能量损耗模型近似相同.如图 2 所示,监控区域划分成  $n$  层,下层节点的监控数据通过上层节点进行转发,同一层节点之间因中继转发而消耗的能量近似相同.

由于无线传感器网络应用于各种复杂环境,网络和节点类型多种多样,本文对采用的网络模型和网络所满足的条件作如下假设:

- 1) sink 节点位置固定,位于网络的某一端,网络类型为多跳自组织网络;
- 2) 节点的类型和初始能量相同,通信距离不随着节点能量的消耗而减小;
- 3) 位于同一层中的节点能量损耗速率相同;
- 4) 不失一般性,假设下层节点的监测数据需要通过上层节点进行转发;
- 5) 由于受能量、天线和环境等不同因素的影响,传感器的探测范围不完全相同,在本模型中,假设网络中所有节点的感知半径  $R$  服从正态分布  $N(u, \delta)$ <sup>[10]</sup>,  $u$  为节点感知半径的均值,  $\delta$  为标准差,且  $u \geq 3.3\delta$  保证节点的感知半径集中分布在  $[0, 2u]$  区间内).

定义 1. 网络生存时间  $T_{Sur}$  为网络开始运行到网络中第 1 个节点死亡的时间.

定义 2. 监控区域被划分成  $n$  层,层的集合为  $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ ,每层节点数量的集合为

$$B = \{b_i | b_i = l_i \text{ 层节点数量}, l_i \in L\}.$$

定义 3. 网络中总节点的数量为  $N$ ,协作覆盖模型在全覆盖条件下所需的最少节点数目为  $N'$ .

能量有效的分层协作覆盖模型 EEHCCM(energy efficient hierarchical collaboration coverage model),就是在一定约束条件下求解网络生存时间的最大值.该模型的目标函数为

$$T_{Sur} = \max(\min_{i=1,2,\dots,l} T_{Sur_i}) \tag{3}$$

约束条件为

$$\sum_{i=1}^n b_i = N \tag{4}$$

$$N > N' \tag{5}$$

$$S_{monitor} \geq S_{area} \tag{6}$$

公式(4)的含义是每层节点的数目之和等于总节点数目,公式(5)和公式(6)是要求节点的部署覆盖整个目标

监控区域.其中, $S_{monitor}$ 是节点覆盖区域的面积, $S_{area}$ 是目标区域的面积.EEHCCM所解决的问题是在某一监测区域,总节点数量已知的情况下,通过优化不同层次区域的节点密度来实现节点能量均衡,延长网络生存时间.

**定理 1.** 能量有效的分层协作覆盖模型的求解是 NP 难度的.

证明:Koopmans 和 Beckmann 在 1957 年提出了二次分配问题(QAP)<sup>[21]</sup>.该问题可描述为有  $n$  个位置和  $n$  个工厂,各个位置之间的距离集合为  $D=(d_{kl})$ ,各个工厂间的货物运输量集合为  $F=(f_{ij})$ ,工厂放置在不同位置的代价集合为  $B=(b_{ik})$ .QAP 模型的目标函数为

$$\min_{\phi \in S^n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij} d_{\phi(i)\phi(j)} + \sum_{i=1}^n b_{i\phi(i)} \quad (7)$$

其中, $d_{kl}$ 是位置  $k$  与位置  $l$  之间的距离, $f_{ij}$ 是位置  $i$  与位置  $j$  之间的货物流动量, $b_{ik}$ 是把工厂  $i$  放置在位置  $k$  的代价.Sahni 和 Gonzalez<sup>[22]</sup>证明了二次分配问题是 NP 难度的.在 ECHCCM 模型中,层与层之间的位置关系对应于 QAP 的集合  $D$ ,节点数量分配集合对应于集合  $F$ ,节点数量放置在不同层的代价对应于集合  $B$ .因此,在节点数目一定的情况下,在确定了各层节点数量的比例之后,即每层的节点数量固定以后,EEHCCM 可以转化为一个二次分配问题.而二次分配问题是 NP 难度的,因此,EEHCCM 问题也是 NP 难度的.

### 3 EEHCCM 的蚁群求解

#### 3.1 蚁群优化算法

由于 EEHCCM 是一个 NP 问题,因此不存在多项式时间内的求解算法.Dorigo 等人<sup>[23]</sup>提出的蚁群算法是解决组合优化问题的一种多代理方法,因其具有正反馈、分布式计算和具有创新性的贪婪启发式搜索的特点,在解决该类问题时具有快速收敛、不会陷入局部最优解的优势.

蚁群算法是模拟蚁群寻找食物的策略而设计的.如图 3 所示,在初始时刻,从左侧和右侧通过障碍物的蚂蚁数量近似相等,但是由于通过右侧到达食物源的距离较短,因此在相同时间内,从右侧到达食物源的蚂蚁数量较多,因此,该条路径上的信息素浓度较高.在下一时刻,蚂蚁选择右侧路径的概率大于选择左侧路径的概率.最终在  $t+n$  时刻,所有的蚂蚁都通过右侧路径到达食物源.

蚁群算法的主要思想是:(1) 蚂蚁随机分布在不同的节点,每只蚂蚁依据转移概率来选择下一条路径;(2) 蚂蚁会在路径上留下信息素,信息素浓度较好的路径会被更多的蚂蚁选择,最终算法收敛;(3) 信息素会随着时间挥发,从而引导蚂蚁探索新的路径,跳出局部最优的情况.

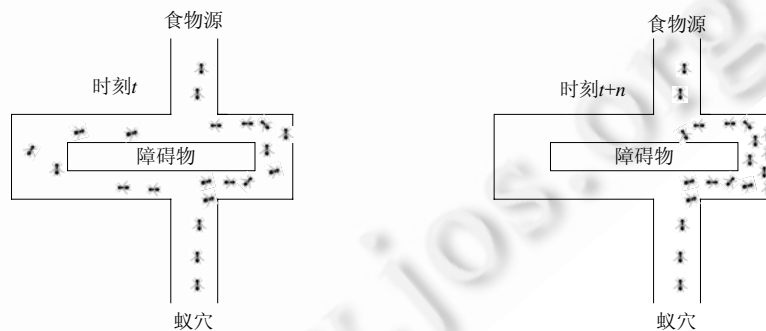


Fig.3 Ants' activity of searching foods

图 3 蚁群寻找食物示意图

#### 3.2 EEHCCM 的蚁群求解算法框架

在应用蚁群算法求解 EEHCCM 时,需要对该问题进行转换,使输入参数类型满足蚁群算法的形式.如果将层次划分的集合  $L$  看成是 TSP 问题中的城市的集合  $C$ ,而每层的节点数集合  $N$  看成是 TSP 问题中城市之间的距离集合  $D$ ,则该问题转化为一个多路径的类 TSP 问题.如图 4 所示,图中的圆代表区域划分中的层,对应于 TSP

问题中的城市;圆之间的弧线代表每层节点的数量  $n_i$ ,对应于 TSP 问题中城市间的距离  $d_{i,j}$ ;网络生存时间  $T_k$  对应于路径长度  $L_k$ .选择第  $k$  条边从层  $i$  转移到层  $j$  的概率定义为  $a_{ij}(k)$ ,该条边上的信息素浓度为  $\tau_{ij}(k, \tau)$ , $k$  代表层  $i$  中的节点数量,层  $i$  和层  $j$  之间第  $k$  条边上的启发式因子为  $\eta_{ij}(k)$ .算法执行时,蚂蚁在各层之间随机游走,通过转移概率确定转移路径,并更新路径上的信息素,最终达到收敛.因此,EEHCCM 的求解问题转化为在遍历图中每个圆的路径集合中搜索使得网络生存时间最长的节点数量组合方式.

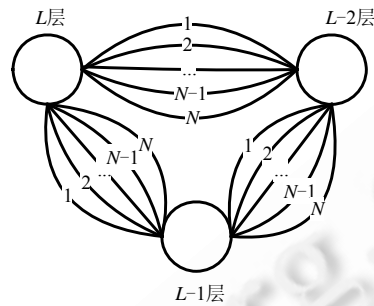


Fig.4 Ant colony optimization for EEHCCM

图4 分层协作覆盖模型的蚁群优化

EEHCCM 的蚁群求解算法模型可以表示为

$$a_{ij}(k) = \frac{[\tau_{ij}(k)]^\alpha [\eta_{ij}(k)]^\beta}{\sum_{l=1}^N [\tau_{ij}(l)]^\alpha [\eta_{ij}(l)]^\beta}, \forall i \neq j \in L \quad (8)$$

$$\tau_{ij}(\tau, k) = \rho \tau_{ij}(\tau - 1, k) + \Delta \tau_{ij} \quad (9)$$

$$\Delta \tau_{ij}(k) = \sum_{a=1}^m \Delta \tau_{ij}^a(k) \quad (10)$$

$$\Delta \tau_{ij}^a(k) = \begin{cases} \frac{Q}{T_k}, & \text{蚂蚁} a \text{ 经过边} k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

算法需要分别构建大小为  $N \times L$  的信息素矩阵和启发式因子矩阵,一个大小为  $L$  的节点禁忌表用来保存蚂蚁已经走过的节点.算法初始化参数以后,蚂蚁随机分布在各个节点,各条边上的信息素浓度相同,每只蚂蚁把当前的节点加入禁忌表,并计算启发式因子从而计算转移概率进行路径选择,然后计算该路径上的信息素增量.在构造完整解后进行模拟路由发包,并计算网络生存时间.在一次迭代循环结束后,更新每条路径上的信息素浓度.在算法执行一段时间后,某些路径上的信息素浓度会增大,导致所有的蚂蚁都选择该路径,此时,算法得到收敛.利用蚁群算法求解能量有效的分层协作模型的算法框架如下:

**算法 1.** 能量有效的分层协作覆盖模型的蚁群求解算法框架.

初始化参数

While (小于最大迭代步骤) do

for 蚁群中每只蚂蚁

for 每个解构造步:

- 1) 将当前节点加入禁忌表;
- 2) 根据第 3.3 节的方法计算启发式因子;
- 3) 根据公式(8)分别计算每条边上的转移概率,并选择到达下一个节点的路径,并将目的节点加入禁忌表.

End for

1. 根据第 3.5 节的方法确定节点的位置;
2. 执行多跳路由算法,并计算网络生存时间  $T_k$ ;
3. 根据公式(10)和公式(11)计算信息素增量,并根据公式(9)进行局部信息素更新.

End for

- 1) 根据已获得的解得质量进行全局信息素更新.

End while end

根据文献[24]的理论,蚁群算法的时间复杂度为  $O(NC \cdot n^2 \cdot m)$ .其中,  $NC$  表示迭代次数,  $n$  为城市数,  $m$  表示蚂蚁数量.当  $m$  和  $n$  近似相等时,算法的时间复杂度为  $O(NC \cdot n^3)$ .在利用蚁群算法求解 EEHCCM 时,路由算法的时间复杂度远小于蚁群算法的时间复杂度,所以整个算法的时间复杂度为  $O(NC \cdot n^2 \cdot m)$ .

### 3.3 分层覆盖模型的启发式因子

在蚁群算法中,启发式因子的选取是影响算法收敛速度的关键因素,它指导着蚂蚁在解空间中探索新的更优路径.在 TSP 问题中,启发式因子  $\eta_{ij}=1/J_{ij}$ ,  $J_{ij}$  是  $i$  和  $j$  之间的距离.但是在分层协作覆盖模型中,网络生存时间不单单取决于某一层节点的数量,而是取决于每层节点数量的比例;而节点数量比例则取决于网络结构和网络能量损耗模型.在多跳网络中,靠近 sink 节点的节点既要发送自身监控数据,同时还需转发较远节点的数据,因此能量损耗相对较快.

**定理 2.** 在分层协作覆盖模型下,最优的节点覆盖是在保证全覆盖的前提下,每层的生存时间均相等.

设  $E_l=n_l \times E_{Res}$ ,  $n_l$  为第  $l$  层的节点数量,  $E_{Res}$  为节点的剩余能量.  $e_l$  为一个监控周期中第  $l$  层节点消耗的能量,则定理 2 的形式化描述为:对于  $\forall l$ ,若满足

$$\frac{E_l}{e_l} = \frac{E_{l-1}}{e_{l-1}} \quad (12)$$

则  $T_{Sur}$  取到最大值.

证明:在节点数量确定的情况下,网络总的初始能量为一个常量.假设网络的生存时间在各层的生存时间不尽相同的情况下取到最大.不失一般性,若假设

$$\frac{E_1}{e_1} = \frac{E_2}{e_2} = \dots = \frac{E_{k-1}}{e_{k-1}} = \frac{E_{k+1}}{e_{k+1}} = \dots = \frac{E_n}{e_n} > \frac{E_k}{e_k} \quad (13)$$

此时,网络生存时间等于节点死亡最快的层  $k$  的生存时间,即  $\max T_{Sur} = T_{Sur(k)}$ .在  $T_{Sur(k)}$  时刻,  $k$  层能量为 0,对于  $\forall p, p \neq k$ ,有  $E_p > 0$  成立.  $\exists \Delta e$ , 当  $\Delta e$  足够小时,有

$$\frac{E_p - \Delta e}{e_p} \geq \frac{E_k + \Delta e}{e_k} > T_{Sur(k)} \quad (14)$$

成立.这时,网络的生存时间更大,与假设相矛盾,因此定理 2 成立.  $\square$

$e_l$  由两部分构成:一部分是  $l$  层节点发送自身监控数据所消耗的能量,另一部分是转发下层节点的数据所消耗的能量.

$$e_l = e_{self} + e_{relay} \quad (15)$$

根据 Heinemann 等人<sup>[25]</sup>的理论,发送和接收  $k$  bit 数据的能量消耗分别为

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k, d) = E_{elec} \times k + \epsilon_{amp} \times k \times d^2 \quad (16)$$

$$E_{Rx}(k, d) = E_{elec} \times k \quad (17)$$

由公式(15)~公式(17)可得:

$$e_l = \sum_{i=1}^{n_l} E_{Tx}(k, d_{n_i}) + \sum_{i=1}^{n_{l-1}} E_{Rx}(k, d_{n_{i-1}n_i}) + E_{Tx}(k, d_{n_l}) \quad (18)$$

假定在节点剩余能量相同的情况下,为了满足公式(12),上层和下层节点的比例需满足:

$$\frac{n_l}{n_{l-1}} = \frac{e_{l-1}}{e_l} \quad (19)$$

代入  $e_l$  的求解公式可得:

$$n_l = \frac{n_{l-2}^2 + n_{l-1}n_{l-2} - n_{l-1}^2}{n_{l-1}} + \frac{n_{l-2}^2 - n_{l-1}^2}{n_{l-1}} \frac{E_{Rx}(k, d)}{E_{Tx}(k, d)} \quad (20)$$

公式(17)给出了根据某一层的下两层的节点数量计算出该层的最优节点数量的公式.使用公式(17)作为启发式因子,仅仅适用于相邻两层节点数量已知的情况.在相邻两层节点数量未知的情况下,可以采用简单启发规则.即:如果从上层节点转移到下层节点,权值大的路径的启发式因子则大;反之,启发式因子则小.因此,EEHCCM 的蚁群优化算法的启发式因子的选取规则是:

- 若  $i > j$

$$\eta_{ij}(k) = \begin{cases} \frac{M}{|n_i^* - k|}, & \text{when } n_{i-1}, n_{i-2} \text{ is known} \\ W \times k, & \text{others} \end{cases} \quad (21)$$

- 若  $i < j$

$$\eta_{ij}(k) = \begin{cases} \frac{M}{|n_i^* - k|}, & \text{when } n_{i-1}, n_{i-2} \text{ is known} \\ \frac{W}{k}, & \text{others} \end{cases} \quad (22)$$

其中,  $\eta_{ij}(k)$  表示从层  $i$  选择第  $k$  条边到层  $j$  的启发式因子;  $n_i^*$  表示层  $i$  的最优节点数量估计,由公式(20)计算得到;  $M$  和  $W$  是任一正常数.不同于 TSP 问题中的启发式因子为静态数组的情况,分层协作覆盖模型蚁群算法中的启发式因子是在蚂蚁选择下一个节点的时候动态计算并更新的.

### 3.4 全覆盖条件下节点数量的上下限

设第  $l_i$  层监控区域面积为  $S_{li}$ ,每个节点的覆盖范围为  $s = 6\sqrt{3} \times u^2$ ,其中,  $u$  为节点感知距离的均值,则要保证在全覆盖的前提下,每层节点数量的下限为

$$\left\lceil \frac{S_{li}}{6\sqrt{3} \times u^2} \right\rceil \quad (23)$$

设已确定节点数量的层的集合为  $P$ ,未确定节点数量的层的集合为  $Q$ ,第  $l_i$  层节点数量的上限为

$$\left\lfloor N - \sum_{k \in P} n_k - \sum_{k \in Q} \frac{S_k}{6\sqrt{3} \times u^2} \right\rfloor \quad (24)$$

节点数量的下限保证了监控区域的全覆盖,而节点数量上限的确定则会大大降低算法的迭代次数.

### 3.5 节点位置的选取

确定了每层的节点数量后,需要指定节点的位置或者分布.节点的部署方式多种多样,在分层协作覆盖模型下,由于节点的感知半径不尽相同,因此无法进行确定性布设.因此,本文采取的是分层的均匀布设方式.即在确定了每层的节点数量后,每层的节点按照均匀分布进行布设.

## 4 仿真及分析

为了验证算法的有效性,本文首先对 CCM 和 EEHCCM 的生存时间进行了仿真实验.设计了一个基于 Matlab 的仿真平台.实验环境如下:CPU 为 AMD2600+,内存为 1G,操作系统为 Windows XP,仿真软件为 Matlab 7.0.算法需要初始化的参数包括蚁群算法的参数和网络参数.仿真区域为  $300 \times 100$  的矩形区域,sink 节点的坐标为  $(0,300)$ ,总节点的数目  $N$  为 282 个,节点的初始能量为 5J,节点的感知半径均值  $r=10$ ,方差  $\delta=2$ .在蚁群算法中,蚂蚁的数目  $m=5$ ,边  $ij$  上的信息素量  $\tau_{ij}$  初始为 0,信息素的相对重要程度  $\alpha=1$ ,启发式因子的相对重要程度  $\beta=5$ ,启发式因子  $\eta_{ij}$  中的常数  $M=1, W=1$ ,蚁环常数  $Q=10$ .

为了验证在 EEHCCM 模型下网络生存时间是否较 CCM 模型得到延长,本文在总节点数量一定的情况下,



分别对以上两种模型在 Matlab 中进行了仿真实验.

图 5 给出了在总节点数量相同的情况下,分别使用 EEHCCM 和 CCM 模型进行区域节点部署的网络生存时间的对比.在总节点数量为 282、每个节点初始能量为 5J 时,EEHCCM 第 1 个节点的死亡时间为 165,而 CCM 第 1 个节点的死亡时间为 105.因此,EEHCCM 模型在延长网络生存时间上要优于 CCM.在 EEHCCM 模型中,最先死亡的节点位于最下层;而在 CCM 模型中,最先死亡的节点位于最上层.这时,下层节点的能量未能得到充分的应用而过分消耗了上层节点的能量,从而造成了网络生存时间的缩短.应用蚁群算法得到的最优解是,第 1 层节点数量为 79,第 2 层节点数量为 85,第 3 层节点数量为 118.节点分布如图 6 所示,最上层节点的数量最多,使得下层节点可选择一个或多个上层节点进行路由转发,从而使得下层节点的能量得到充分应用;而上层节点通过数量的优势来减轻路由转发带来的能量消耗,使得各层的能量消耗速度近似相同.

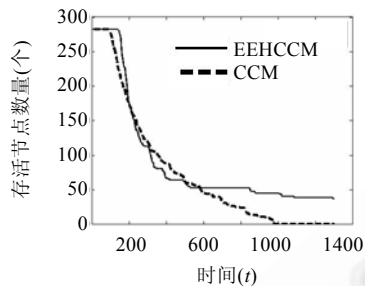


Fig.5 Network lifetime of EEHCCM & CCM

图 5 EEHCCM 和 CCM 生存时间对比

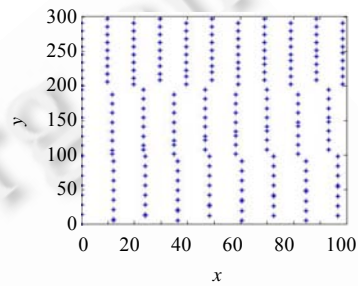


Fig.6 Optimal deployment in EEHCCM

图 6 EEHCCM 最优节点部署

当节点初始能量不同时,应用 EEHCCM 和 CCM 模型,网络生存时间的对比见表 1.当节点的初始能量增加时,网络的生存时间也得到延长,这反映在无论是第 1 个节点的死亡时间还是最后一个节点的死亡时间都相应地有所增加.与图 5 的结果类似,在节点初始能量不同时,无论是第 1 个节点的死亡时间还是最后一个节点的死亡时间,EEHCCM 模型都要优于 CCM 模型.因此,一定覆盖程度下,EEHCCM 模型可延长网络生存时间,更适用于实际的目标区域覆盖.

Table 1 Network lifetime of EEHCCM & CCM in different initial energy

表 1 不同初始能量 EEHCCM 和 CCM 生存时间对比

初始能量	覆盖模型	第 1 个节点死亡时间	最后一个节点死亡时间
1J	CCM	33	350
	EEHCCM	45	702
2J	CCM	59	675
	EEHCCM	92	1 124
5J	CCM	105	998
	EEHCCM	165	2 013

为了比较 EEHCCM 模型与其他能量有效的覆盖算法在性能上的差异,本文选取了 EERNFS 和 PEAS 作为参考算法进行了对比仿真实验.

图 7 给出了在不同节点数目下,PEAS,EERNFS 和 EEHCCM 模型的网络生存时间对比.在节点数目小于 500 时,由于采取分层的布设,使得节点的分布密度得到了合理的设置,因此在网络生存时间上,EEHCCM 要优于 PEAS 和 EERNFS.当节点数目大于 500 时,由于 PEAS 和 EERNFS 采取了休眠调度机制,使得冗余节点的能量得到了节省,而 EEHCCM 模型没有加入休眠调度,因此所有节点都工作在正常工作模式下,因此在网络生存时间上要小于其他两种模型,这也是模型需要进一步改进的地方.与 PEAS 和 EERNFS 算法相比,EEHCCM 更适用于总节点数量受限的稀疏布设环境.需要说明的是,EERNFS 在节能覆盖上要优于 PEAS 算法,但是该覆盖算法是建立在节点具有低能耗的监听信道的基础上的.表 2 给出了节点初始能量为 5J 时,3 种算法的节点失效情况.



**Table 2** Network lifetime under PEAS, EERNFS & EEHCCM

**表 2** PEAS,EERNFS 和 EEHCCM 生存时间对比

节点数目	覆盖模型	第 1 个节点死亡时间	最后一个节点死亡时间
100	PEAS	28	1 398
	EERNFS	72	1 422
	EEHCCM	87	1 648
300	PEAS	115	1 538
	EERNFS	145	1 865
	EEHCCM	167	2 035
800	PEAS	245	2 513
	EERNFS	280	2 722
	EEHCCM	201	2 357

由于 EEHCCM 模型没有加入休眠调度策略,在节点稠密布设的情况下,生存时间相对于 PEAS,EERNFS 模型要短.由于 PEAS 算法中的自适应休眠调度策略和 EEHCCM 模型的覆盖优化算法处在不同阶段,因此,EEHCCM 模型可以和 PEAS 的自适应休眠调度策略结合起来.图 8 给出了 EEHCCM 与结合自适应休眠调度策略的 EEHCCM 的生存时间进行对比的情况,由于引入了自适应休眠调度策略,在节点密度较大的情况下,网络的生存时间得到了较大的提升.

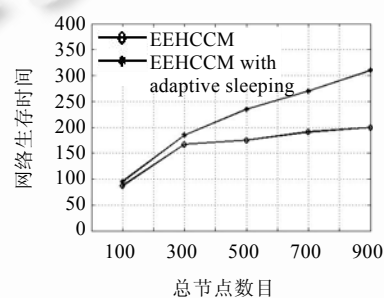
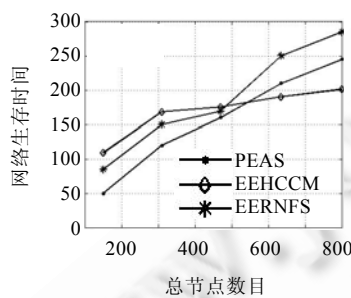


Fig.7 Network lifetime of PEAS, EERNFS & EEHCCM Fig.8 Network lifetime of EEHCCM & EEHCCM-AS

图 7 PEAS,EERNFS 和 EEHCCM 网络生存时间对比 图 8 EEHCCM 和 EEHCCM-AS 生存时间对比

图 9 给出了 EEHCCM 模型在取得最优解的情况下,3 层节点的总能量损耗随时间的变化情况.横坐标表示时间,纵坐标表示剩余节点能量总和占节点初始能量总和的比例.节点的剩余能量总和一开始随着时间呈线性减小的趋势,然后呈曲线下降,最后收敛于 0.由于第 2 层和第 3 层节点还需进行路由转发,而且蚁群算法求出的解是近似最优解,因此节点能量消耗速度略大于第 1 层节点的能量消耗速度.反映在图中就是第 2 层能量消耗曲线的斜率略大于第 1 层能量消耗曲线的斜率,第 3 层能量消耗曲线的斜率略大于第 2 层能量消耗曲线的斜率.但是,3 层节点总的能量消耗随时间变化趋势近似相同,这验证了定理 2 的正确性.

图 10 反映了在层数不同时,EEHCCM 模型的生存时间对比情况.本文通过对比将目标区域划分为 3,4,5 层时节点的生存情况可以看出,在层划分较细(层数较多)的情况下,模型的优化程度越高,网络的生存时间越长.但是,随着层数的增加,EEHCCM 模型的解空间呈指数型增加,求解时所需的迭代次数也大为增加.

图 11 反映了蚁群算法求解 EEHCCM 模型的收敛情况.在迭代求解共需 3 697 960 次循环才可以求得最优解的情况下,蚁群算法在第 1 364 次迭代时就得到了收敛,表现出了蚁群算法在求解该类问题时的优越性.

图 12 描述了在层数为 3 和层数为 4 时,蚁群算法收敛时间的对比情况.在层数增加时,解空间的大小呈指数性增长,算法迭代步骤也大为增加.因此,在选择层的划分数量时,生存时间最大化和算法收敛时间是一对相互制约的因素,常用的方法是在可接受的算法计算时间内使生存时间最大化.

第 3.4 节中描述的全覆盖条件下节点数量的上下限计算方法,在一定程度上缩小了解空间的大小,使算法的收敛时间得到了缩短,如图 13 所示.图中虚线为未添加节点数量上下限约束时算法的收敛情况,实线表示添加节点数量上下限约束时算法的收敛情况.由于约束条件的减少,解空间的大小远大于添加数量约束时解空间

的大小,算法在进行搜索时,所需迭代次数有所增加,而且寻找到局部最优解的概率也增大,具体表现为图中虚线的阶梯数要多于实线的阶梯数(每一个阶梯顶部代表一个局部最优解).

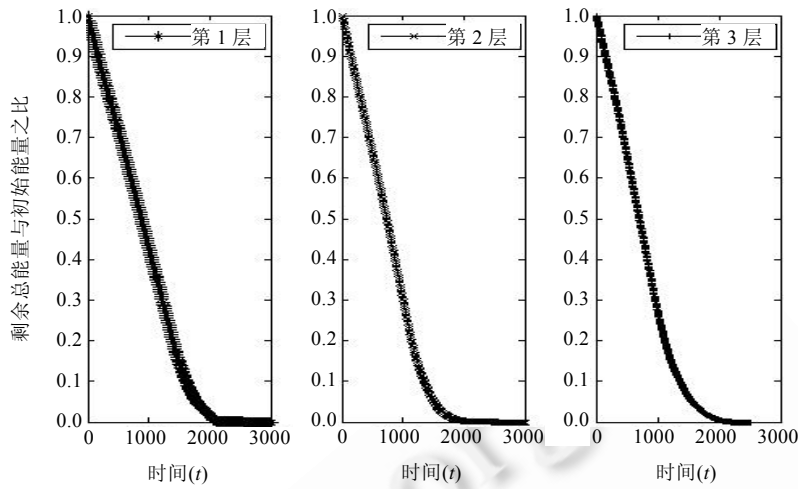


Fig.9 Residual energy of different layers

图9 各层剩余能量对比

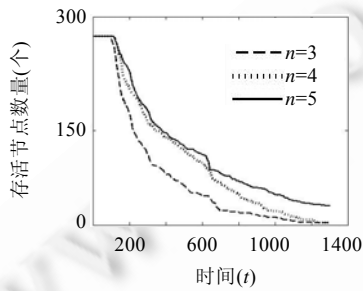


Fig.10 Network lifetime in different layer count  
图10 EEHCCM 层数不同时生存时间的对比

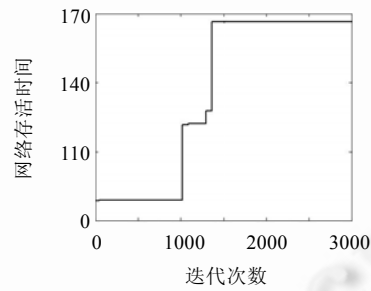


Fig.11 Convergence of ACO for EEHCCM  
图11 EEHCCM 的蚁群算法收敛图

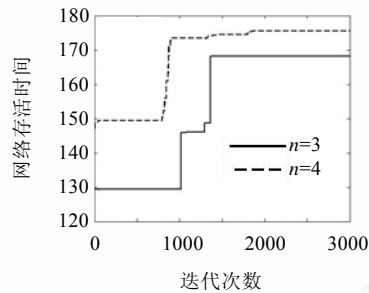


Fig.12 Convergence speed in different layer count  
图12 EEHCCM 层数不同时算法收敛时间对比

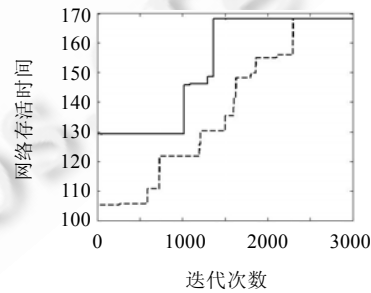


Fig.13 Upper-Lower limit accelerates convergence  
图13 节点数量上下限对算法收敛时间的提升

### 5 结束语

本文基于协作覆盖模型,通过对节点能量损耗进行建模,提出了能量有效的分层协作覆盖模型 EEHCCM,并使用蚁群算法对该模型进行求解.该模型在保证全覆盖的条件下,可以使网络的生存时间得到延长.但是,本

文的研究并未涉及层的划分粒度问题和在节点能量不相同时的情况.因此,今后的工作重点是建立模型求解最优划分粒度和节点异构时的模型的改进.另外,EEHCCM 是冗余覆盖模型,可以结合休眠调度算法来对网络生存时间进一步优化.

#### References:

- [1] 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/1000-9825/20030713.htm>
- [2] Ma ZC, Sun YN, Mei T. Survey on wireless sensor networks. *Journal of Communications*, 2004,25(4):114–124 (in Chinese with English abstract).
- [3] Ren Y, Zhang SD, Zhang HK. Theories and algorithms of coverage control for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2006,17(3):422–433 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/422.htm> [doi: 10.1360/jos170422]
- [4] Zhang HH, Hou JC. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. *Journal of Ad Hoc and Sensor Wireless Networks*, 2005,1(1-2):89–124.
- [5] Meguerdichian S, Koushanfar F, Potkonjak M, Srivastava MB. Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks. *IEEE Infocom*, 2001,3:1380–1387. [doi: 10.1109/INFCOM.2001.916633]
- [6] Meguerdichian S, Koushanfar F, Qu G, Potkonjak M. Exposure in wireless ad hoc sensor networks. In: *Proc. of the ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*. New York: ACM, 2001. 139–150. [doi: 10.1145/381677.381691]
- [7] Onur E, Ersoy C, Delic H. Finding sensing coverage and breach paths in surveillance wireless sensor networks. In: Agustí R, Sallent O, eds. *Proc. of the 2004 15th IEEE Int'l Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. Piscataway: IEEE, 2004. 984–988. [doi: 10.1109/PIMRC.2004.1373846]
- [8] Ye F, Zhong G, Lu SW, Zhang LX. PEAS: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks. In: *Proc. of the 10th IEEE Int'l Conf. on Network Protocols*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2001. 200–201. [doi: 10.1109/ICNP.2002.1181406]
- [9] Ozgur SH, Hasan C. Energy efficient differentiable coverage service protocols for wireless sensor networks. In: Kumar M, ed. *Proc. of the 3rd IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom 2005)*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2005. 406–410. [doi: 10.1109/PERCOMW.2005.31]
- [10] Wang HZ, Meng FZ, Li ZZ. Energy efficient coverage conserving protocol for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2010,21(12):3124–3137 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3693.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03693]
- [11] Xu PF, Chen ZG, Deng XH. Distributed Voronoi coverage algorithm in wireless sensor networks. *Journal of Communications*, 2010,31(8):16–25 (in Chinese with English abstract).
- [12] Prabh KS, Deshmukh C, Sachan S. A distributed algorithm for hexagonal topology formation in wireless sensor networks. In: Grau A, Hung JC, eds. *Proc. of the IEEE Conf. on Emerging Technologies & Factory Automation*. 2009. 1–7. [doi: 10.1109/ETFA.2009.5347085]
- [13] Sounak P, Sukumar N, Indrajeet S. A dynamic balanced-energy sleep scheduling scheme in heterogeneous wireless sensor network. In: *Proc. of the 2008 16th Int'l Conf. on Networks (ICON)*. Piscataway: IEEE, 2008. 1–6. [doi: 10.1109/ICON.2008.4772568]
- [14] Costa DG, Guedes LA. Coverage-Aware node-disjoint multipath selection in wireless multimedia sensor networks. In: *Proc. of the 2011 4th IFIP Int'l Conf. on New Technologies, Mobility and Security*. Piscataway: IEEE, 2011. 1–5. [doi: 10.1109/NTMS.2011.5720610]
- [15] Martins FVC, Carrano EG, Wanner EF, Takahashi RHC, Mateus GR. A hybrid multiobjective evolutionary approach for improving the performance of wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 2011,11(3):545–554. [doi: 10.1109/JSEN.2010.2048897]
- [16] Jia J, Chen J, Chang GR, Tan ZH. Energy efficient coverage control in wireless sensor networks based on multi-objective genetic algorithm. *Computers and Mathematics with Applications*, 2009,57(11-12):1756–1766. [doi: 10.1016/j.camwa.2008.10.036]
- [17] Begum S, Tara N, Sultana S. Energy-Efficient target coverage in wireless sensor networks based on modified ant colony algorithm. *Int'l Journal of Ad Hoc, Sensor & Ubiquitous Computing (IJASUC)*, 2010,1(4):29–36. [doi: 10.5121/ijasuc.2010.1403]

- [18] Lu KZ, Sun HY. Greedy approximation algorithm of minimum cover set in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2010,21(10):2656–2665 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3670.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03670]
- [19] Zheng GQ, Li JD, Li HY, Zhou ZL. Energy efficient relay node fast selection algorithm for multi-hop wireless sensor networks. *Journal of Communications*, 2010,31(11):158–170 (in Chinese with English abstract).
- [20] Yang BW, Yu HY, Li LH, Li H. An energy efficient cooperative density control algorithm in large wireless sensor networks. In: Letaief KB, *et al.*, eds. *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf.* Piscataway: IEEE, 2007. 4102–4106. [doi: 10.1109/WCNC.2007.749]
- [21] Koopmans TC, Beckmann MJ. Assignment problems and the location of economic activities. *Econometrica*, 1957,25:53–76. [doi: stable/1907742]
- [22] Sahni S, Gonzalez T. P-Complete approximation problems. *Journal of the Association of Computing Machinery*, 1976,23(3):555–565. [doi: 10.1145/321958.321975]
- [23] Dorigo M, Birattari M, Stuzle T. Ant colony optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2006,1(4):28–39. [doi: 10.1109/MCI.2006.329691]
- [24] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics—Part B*, 1996,26(1):1–13. [doi: 10.1109/3477.484436]
- [25] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient communication protocols for wireless micro sensor networks. In: Sprague R, ed. *Proc. of the 33rd Hawaii Int'l Conf. on System Sciences (HICSS)*. Washington: IEEE Computer Society, 2000. 2–5. [doi: 10.1109/HICSS.2000.926982]

#### 附中文参考文献:

- [1] 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/1000-9825/20030713.htm>
- [2] 马祖长,孙怡宁,梅涛.无线传感器网络综述.通信学报,2004,25(4):114–124.
- [3] 任彦,张思东,张宏科.无线传感器网络中覆盖控制理论与算法.软件学报,2006,17(3):422–433. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/422.htm> [doi: 10.1360/jos170422]
- [10] 王换招,孟凡治,李增智.高效节能的无线传感器网络覆盖保持协议.软件学报,2010,21(12):3124–3137. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3693.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03693]
- [11] 徐鹏飞,陈志刚,邓晓衡.无线传感器网络中的分布式 Voronoi 覆盖控制算法.通信学报,2010,31(8):16–25.
- [18] 陆克中,孙宏元.无线传感器网络最小覆盖集的贪婪近似算法.软件学报,2010,21(10):2656–2665. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3670.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03670]
- [19] 郑国强,李建东,李红艳,周志立.多跳无线传感器网络的高效中继节点快速选择算法.通信学报,2010,31(11):158–170.



杨勇(1984—),男,江苏徐州人,博士生,主要研究领域为无线传感器网络.



周勇(1974—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为无线传感器网络,数据挖掘.



夏士雄(1961—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为无线传感器网络,智能信息处理.