

## 基于连通覆盖度的 WSN 分簇协议

马小飞<sup>1</sup>, 缪 亮<sup>2</sup>, 范媛媛<sup>3</sup>

(1. 河南大学计算机与信息工程学院, 开封 475004; 2. 开封教育学院计算机系, 开封 475000; 3. 北京邮电大学计算机学院, 北京 100876)

**摘 要:** 针对层次型分簇网络的结构特性, 提出基于连通覆盖度的 WSN 分簇协议。利用最大熵原理对整个网络进行预分簇得到临时簇头, 在保证网络覆盖度的前提下获取各簇内活跃节点的连通支配集, 通过优化更新临时簇头选出真实簇头和替补簇头, 实现簇内与簇间节点的通信。仿真结果表明, 相比 HEED, SPAN 协议, 该协议能均衡分簇能量, 优化连通覆盖性能, 具有较强的鲁棒性。

**关键词:** 连通覆盖度; 分簇; 负载均衡; 鲁棒性

## WSN Clustering Protocol Based on Connectivity Coverage

MA Xiao-fei<sup>1</sup>, MIAO Liang<sup>2</sup>, FAN Yuan-yuan<sup>3</sup>

(1. College of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475004;

2. Department of Computer Science, Kaifeng Institute of Education, Kaifeng 475000;

3. College of Computer, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876)

**【Abstract】** Aiming at the structural property of layered clustering network, this paper proposes a WSN clustering protocol based on connectivity coverage. It makes use of maximum entropy principle to select temporary cluster head by pre-clustering for whole network, and selects Connected Dominating Set(CDS) of active nodes in each cluster under the premise of coverage connectivity, and selects real and substitute cluster head by optimizing and updating temporary node to realize communication between intra-cluster and inter-cluster. Simulation result shows that this protocol can improve the connectivity coverage performance, balance energy in clustering, and achieve strong robustness compared with HEED and SPAN protocol.

**【Key words】** connectivity coverage; clustering; load balance; robustness

### 1 概述

无线传感器网络现已广泛应用于军事、环境监测和现代化农业等方面, 具有重要研究意义和实用价值。通过高效节能延长网络寿命是无线传感器网络的首要设计目标。网络覆盖度和连通度对网络能耗的影响很大, 尤其在环境监视领域, 应该对所属区域进行全区域监测, 否则会发生重大事故。

目前已有文献对覆盖度和连通度进行了研究, 其中, 对网络覆盖度的研究较多。文献[1]用多目标遗传算法对整个区域进行覆盖度最优解点集求解, 其缺点是刻意追求覆盖度, 而没有与连通度、网络能耗等 QoS 指标之间取得很好的权衡。文献[2]使用线性规划方法选择保持覆盖度的最小活跃节点集, 但其需要网络的全局信息, 扩展性较差。由于以上文献中均没有强调连通度, 因此可能出现活跃节点无法将感知数据传输到基点、节点间协作以及信息传递等不确定行为。文献[3]首次综合两者的优化解决方案, 提出可以对不同应用需求提供 K-coverage 保证的覆盖度配置协议(Coverage Configuration Protocol, CCP), 从几何分析的角度对两者进行理论证明。由于采用的节点是随机布置的, 因此盲点是不可避免的。文献[4]对其进行改进, 提出 CCNAS 算法, 并证明该方法可以满足全覆盖和全连通。上述文献中的网络均是平面型网络, 扩展性较差。

分簇作为设计无线传感器分布式网络的一种重要思想, 使网络具有能量高效、可扩展性强和鲁棒性的特点。但现有分簇算法大多从节点剩余能量、候选簇头节点相对于其他节

点的位置指标实施的能量均衡型分簇, 但没有考虑网络覆盖度。

与以往能量均衡型的分簇不同, 本文提出的基于连通覆盖度的分簇协议(Connectivity Coverage Clustering Protocol, CCCP)在考虑节点剩余能量的同时, 兼顾了节点的连通度和覆盖度。CCCP 无需考虑分簇是否均匀, 在整个网络的前提下尽量减少簇重构以稳定各分簇的结构。该协议依据“分而治之”的原则, 用最大熵原理对整个网络进行分簇, 选出临时簇头, 使每个簇内节点在保证连通性的同时优化选取活跃节点, 剩余节点转入睡眠状态, 为使用最少节点完成区域覆盖形成一个连通支配集(Connected Dominating Set, CDS), 选出簇头, 并在簇头的一跳范围内依据剩余能量和节点覆盖度指标确定替补(back-up)簇头以缓解簇头节点的能量消耗。仿真实验证实了该协议不仅高效节能且能保证网络的连通性和覆盖度。

### 2 相关工作

#### 2.1 网络基本模型

为了便于研究, 本文假设  $n$  个传感器节点随即部署在一

**基金项目:** 国家“863”计划基金资助项目(2007AA01Z478); 河南省教育厅自然科学基金资助项目(2008A520002); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划基金资助项目(08210221000)

**作者简介:** 马小飞(1981—), 男, 硕士, 主研方向: 无线传感器网络, 数据融合及其安全; 缪 亮, 副教授; 范媛媛, 硕士

**收稿日期:** 2010-02-21 **E-mail:** maying2003@163.com

个区域内且有以下性质：

(1)所有节点都是同质传感器节点，通信能力、节点能量有限，各个传感器的感知半径为  $R_s$  和通信半径为  $R_c$  ( $R_c \geq 2R_s$ )，感知和通信区域都为感知圆形区域；

(2)节点具有唯一的 ID，且有定位能力(如 GPS 或虚拟坐标)，随机部署后不能移动，为静态网络结构；

(3)为了保持网络的有效性，允许一定的覆盖度冗余；

(4)考虑到每个节点的剩余能量和位置信息，对监视区域  $A$  内的任一点  $(x, y)$  定义其所监视区域的总能量为  $E_{total}(x, y) = \sum_{S_i(x, y) \in C(S_i)} E(s_i)$ ，其中， $E(s_i)$  是节点  $s_i$  的剩余能量； $C(S_i)$  是节点的感知半径。

## 2.2 最大熵原理

最大熵原理分簇<sup>[5]</sup>满足以下条件：

$$u_{ik} \in [0, 1], 1 \leq i \leq C, 1 \leq k \leq n \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^C u_{ik} = 1, 1 \leq k \leq n \quad (2)$$

$$0 < \sum_{k=1}^n u_{ik} < n \quad (3)$$

最大熵分簇(Maximum Entropy Clustering, MEC)的目标函数定义为

$$J(U, V) = \sum_{i=1}^C \sum_{k=1}^n u_{ik} \|x_k - v_i\|^2 + r \sum_{i=1}^C \sum_{k=1}^n u_{ik} \ln u_{ik} \quad (4)$$

其中， $\|\cdot\|$  指欧氏距离； $r$  是常数，其计算复杂度为  $O(N^2)$ ，用拉格朗日乘子方法分别得到簇质心和隶属度的迭代公式：

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^n u_{ik} x_k}{\sum_{k=1}^n u_{ik}}, i = 1, 2, \dots, C \quad (5)$$

$$u_{ik} = \frac{e^{-\|x_k - v_i\|^2 / r}}{\sum_{h=1}^C e^{-\|x_k - v_h\|^2 / r}}, i = 1, 2, \dots, C, k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

## 3 基于连通覆盖度的分簇协议

### 3.1 簇的形成

将  $n$  个传感器节点构成的集合  $S = \{n_1, n_2, \dots, n_n\}$  构成  $C$  个簇。用  $z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ ,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_c\}$  分别代表节点位置和簇质心， $U = \{u_{ik}\}_{c \times n}$  是一个隶属度矩阵， $u_{ik}$  代表第  $i$  个簇内第  $k$  个节点的隶属度。利用信息理论的无偏差估计方法找到一个避免偏差的概率分布  $U$ 。不断更新  $U^{(r)}$  及隶属度，确定临时簇头节点和各个簇的成员。

簇的形成算法具体描述如下：

- (1)基站设置分簇的总个数  $C$  ( $2 \leq C \leq n$ ) 和收敛阈值  $\alpha$  的值，然后初始化隶属度矩阵  $U^{(0)}$ ；
- (2)利用式(5)计算  $V^{(r)}$ ；
- (3)用  $V^{(r)}$  和式(6)更新  $U^{(r)}$  至  $U^{(r+1)}$ ；
- (4)如果满足  $\|V^{(r+1)} - V^{(r)}\|_F < \alpha$ ，则停止迭代，否则令  $r = r + 1$ ，并继续执行步骤(2)，其中， $\|\cdot\|_F$  指弗罗宾尼斯范数；
- (5)用簇质心  $v_i$ 、隶属度  $u_{ik}$  分别确定临时簇头节点和各个簇的成员，根据  $\max_{1 \leq k < n} (\theta_{k+1} - \theta_k) > \Delta\theta$  确定各簇的边界节点。

### 3.2 簇内CDS的选取和簇头的优化更新

由 3.1 节得到的初始簇，所有节点均已获知自己的局部信息，如其邻接点 ID 和位置信息。各临时簇头将各自簇的初始信息(簇总能量、簇覆盖度、节点数)通过多跳方式发送给

基站，基站据此计算每个簇大致的初始覆盖度  $C_{initial}$  以及完成簇覆盖所需的最低活跃节点数  $N_{need}$ ，将其返回给各临时簇头并开始执行簇更新优化，选取活跃节点，剩余节点转入睡眠状态。在该阶段的初期，所有节点初始状态均为激活(active)状态，各节点探测其感知区域是否被邻居节点覆盖，若被完全覆盖，则该节点转入睡眠状态，反之保持激活状态。

假定  $g(x, y)$  是节点  $S_k$  感知区域内的任一点， $S_k$  需知道  $g(x, y)$  被其他邻居接点覆盖冗余值  $\xi_i^k$ ， $\xi_i^k$  指  $g(x, y)$  除被节点  $S_k$  覆盖外也被其他邻居节点覆盖的冗余值， $S_i$  指能探测到  $g(x, y)$  的节点集， $S_k \in S_i$ 。  $\xi_i^k = \frac{P_i(S_i / \{S_k\})}{P_i(\{S_k\})}$ ，当  $0 \leq \xi_i^k < 1$  时，

$S_k$  处于激活状态；当  $\xi_i^k \geq 1$  时处于睡眠状态。由于本文协议设计允许一定的覆盖冗余度  $\delta_{th}$ ，因此  $\xi_i^k = \frac{P_i(S_i / \{S_k\})}{P_i(\{S_k\})}$ ，当

$\xi_i^k \geq \delta_{th}$  时， $S_k$  处于睡眠状态，反之  $S_k$  处于激活状态。

对  $\delta_{th}$ ，设对  $S_k$  内任一点  $g(x, y)$ ，定义该点被检测到的总覆盖度为  $O_{total}(x, y) = \sum_{S_i(x, y) \in C(S_i)} 1$ ，则节点  $S_k$  的覆盖冗余度为  $\delta_{th} = \int_{C(S_k)} \frac{d_x d_y}{O_{total}(x, y)} = \int_{C(S_k)} \frac{d_x d_y}{\sum_{S_i(x, y) \in C(S_k)} 1}$ 。

为了避免所有节点同时执行探测功能并做出状态决定导致互相干扰、信息碰撞失真、出现盲点问题，本文引入随机延迟机制，使每个节点在  $T_d$  延迟时间内执行均属有效探测，这样能提高具有较小能量的节点在下个周期成为激活节点的概率。

单独考虑覆盖度并不一定能保证该节点集是一个连通覆盖集。本文采用使整个网络保持连通的充分条件  $R_c \geq 2R_s$  (详细证明见文献[6])，各节点执行上述探测方法后，各簇内出现一组保持一定网络覆盖度的活跃节点集合  $S_a$ ，显然， $S_a \in S$ ，各簇质心  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_c\} \in S_a$ 。各临时簇头将有关信息发送给基站，基站通过计算选定各簇内感知半径较小且具有较大剩余能量的活跃节点充当簇头，当能量值相等时，选择 ID 号较小的节点作为簇头。

### 3.3 替补簇头节点的产生

在选取簇头节点后，在其一跳邻接点集合中(该邻接点不属于连通支配集即睡眠节点)选择与其当前剩余能量和感知半径、通信半径相似度最接近的睡眠节点作为其替补簇头。当簇头节点的剩余能量低于一定值时，如当  $E_{H_k} \leq E_{ave(ik)}$  或簇头节点发生物理故障时，由替补节点担任该簇新的簇头，同时该当选簇头以同样方法选择自己的替补簇头。

选择替补簇头的方法有利于减少簇头接点过量负载，使网络负载更加均衡以延长网络寿命，也有利于避免由于某个簇头节点过早死亡而影响网络监视覆盖度，且只需要进行局部调整来选择替补簇头，减少了网络能耗。

### 3.4 数据通信阶段

数据通信由簇内和分簇间 2 级通信来实现。2 个远距离节点直接进行数据通信的能耗要远大于采用多跳方式通信的能耗，因此，本文每个簇内或簇间均采用多跳方式通信。数据传递过程需要寻求从每个节点(簇头)到簇头间的最低成本路径，Dijkstra 算法被用来寻找从单个目标节点到所有其他节点的最短路径，采用其推导出的最低成本路径方法<sup>[5]</sup>在每个簇内完成簇头和 CDS 选择。簇内活跃节点周期性地收集其感

知半径内的数据并将其传递给簇头，簇头对数据进行加工处理(如进行数据融合)后，将其沿最低成本路径经多跳方式传递给基站。由于节点位置信息量较小，因此本文不考虑能耗。

#### 4 仿真实验

本文采用 NS2 仿真平台，对 CCCP, HEED 和 SPAN 进行性能比较，限于篇幅，本文罗列部分仿真实验参数，见表 1。

表 1 仿真参数	
参数	参数值
信道带宽/(Mb·s <sup>-1</sup> )	1
广播范围/m	70
感知半径/m	15
MAC 层协议	CSMA/CA
基点坐标	(0,0)
节点初始能量/J	2

假设在一个 100 m×100 m 区域内随机均匀部署节点，为研究该协议下网络的可扩展性，分别取节点数为 100 个、200 个、300 个、400 个时网络运行 20 次得到的平均值。基站位于该区域的中心且  $R_c \geq 2R_s$ ，节点采样间隔为 0.5 s，每次采样生成数据总量为 2 KB。

图 1 表示 CCCP 协议在不同网络规模下活跃节点所占比率，由图 1 可知，随着  $R_c$  的增大，活跃节点比率逐渐减少，但到一定程度后减少趋势变得不明显，这是由于 CCCP 中活跃节点减少至一定程度时，网络必须保留一定数量的活跃节点维持连通覆盖度。

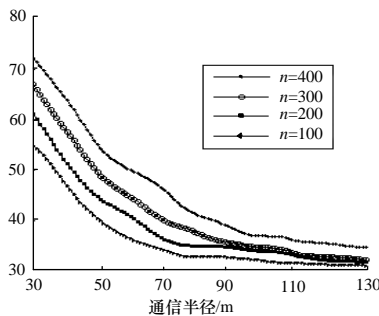


图 1 活跃节点比率与通信半径的关系

由图 2 可知，随着网络覆盖度的减少，使用 CCCP 时的网络覆盖时间明显优于 HEED, SPAN。

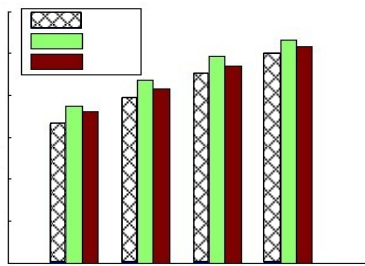


图 2 不同覆盖度时 3 种协议的生存时间比较

结合图 3，在 4 种网络规模下，各运行 20 次实验所得到的睡眠节点所占百分比的平均值可知，随着网络规模的扩大，睡眠节点数量同比增多，但无论在何种网络规模下，CCCP 中睡眠节点所占比例最多，节省了网络剩余能量，有效延长了整个网络的总生存时间。随着网络生存时间的延续，网络的总剩余能量逐渐减少，从图 4 可知，生存时间大约在 2 000 s

和 4 000 s 时，使用 SPAN 协议的网络总剩余能量要优于使用 CCCP 协议时的网络，但使用 SPAN 的网络总剩余能量减少趋势明显。从整体上讲，使用 CCCP 要优于其他 2 种协议，CCCP 的减少趋于平缓，说明了 CCCP 具有很好的鲁棒性。

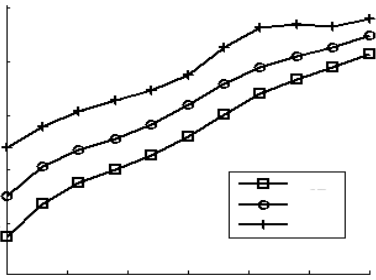


图 3 睡眠节点比率与网络规模的关系

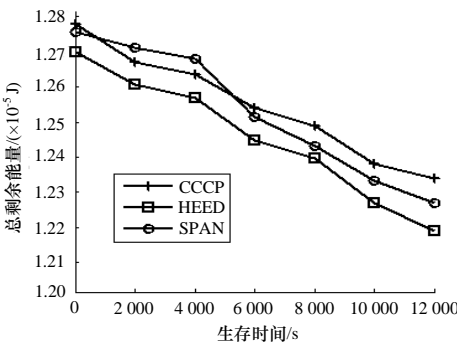


图 4 网络生存时间与总剩余能量的关系

#### 5 结束语

本文提出的基于连通覆盖度的分簇协议在静态网络中很有效，均衡了能量消耗，延长了网络生存时间，且具有较强的可扩展性。下一步工作为：开发适应于无线传感器异构网络<sup>[7]</sup>中的连通覆盖协议。

#### 参考文献

- [1] Jia Jie, Chen Jian, Chang Guiran. Energy Efficient Coverage Control in Wireless Sensor Networks Based on Multi-objective Genetic Algorithm[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2009, 57(11/12): 1756-1766
- [2] Chakrabarty K, Lyengar S S. Grid Coverage for Surveillance and Target Location in Distributed Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Computer, 2002, 51(12): 1448-1453.
- [3] 文 戈, 王国军. WSNs 中基于 Voronoi 图的分布式覆盖协议[J]. 计算机工程, 2008, 34(9): 145-148.
- [4] Zhou Yi, Chakraarty K. A Distributed Coverage and Connectivity Centric Technique for Selecting Active Nodes in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Computer, 2005, 54(8): 978-991.
- [5] Wang Xue, Ma Junjie, Wang Sheng. Parallel Energy-efficient Coverage Optimization with Maximum Entropy Clustering in Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2009, 4(12): 10-21.
- [6] 于继明, 孙亚民, 杨余旺, 等. 无线传感器网络随机部署连通性研究[J]. 计算机工程, 2008, 34(10): 104-106.
- [7] 刘 浩, 邹雪城, 李 鹏, 等. 无线传感器网络终端引导程序设计[J]. 计算机工程, 2010, 36(2): 33-35.

编辑 陆燕菲