

一种基于地理位置信息的高能效无线传感器网络

闫斌¹ 周小佳¹ 王厚军¹ 郎方年² 李本亮¹

摘要 分簇协议的目的是要利用节点有限的资源, 完成高效的数据采集任务, 延长网络使用寿命. 在基于簇的网络结构基础上, 提出并行分布式自组织成簇协议 (Parallel distributed self-organization clustering protocol, PDSOCP), 按地理位置将目标区域划分为若干均匀分布的逻辑区域, 每个区域根据节点剩余能量多少以及到区域内其余节点平均距离远近选择一个簇头, 以代理和簇头共同管理簇事务, 并建立了自适应路由. 实验表明, 该算法能够减少网络能耗, 有效延长网络寿命, 获得更好的性能.

关键词 无线传感器网络, 簇, 能量高效, 路由
中图分类号 TP393

An Energy-efficient Wireless Sensor Network Based on Geographical Information

YAN Bin¹ ZHOU Xiao-Jia¹ WANG Hou-Jun¹ LANG Fang-Nian² LI Ben-Liang¹

Abstract The purpose of clustering protocol is to achieve efficient data collection by making use of the limited resource in wireless sensor networks, which prolongs the lifetime of networks. In this paper, the parallel distributed self-organization clustering protocol (PDSOCP) based on clustering architecture is proposed. It partitions the target area into many small logic zones distributed uniformly according to the geography locations of the nodes. Every zone selects a cluster head according to the residual energy and the distance between the node and other nodes in the zone. Cluster head and agent manage the cluster together. Furthermore, a kind of adaptive routing algorithm has been established. Simulations show that the algorithm yields an improvement in saving energy and prolonging system lifetime, as well as achieving better performance.

Key words Wireless sensor network, clustering, energy efficiency, routing

无线传感器网络 (Wireless sensor network, WSN) 是一种基于无线通信技术的、低功耗和自组织网络, 一般由一个或多个基站 (Sink 节点) 和大量部署于监测区域、配有各类传感器的无线网络节点构成. 为了提高网络的性能, 提出了许多路由协议, 这些协议将各独立节点组成一个共同完成某个特定任务的高性能网络结构.

在基于虚拟区域划分的协议中, 比较典型的是 GAF^[1], 它根据节点位置将目标区域划分为多个四边形网格; TTDD^[2] 算法解决了 GAF 静态分配网格大小的不足, 以源节点为中心动态建立网格; 文献 [3-4] 采用以蜂窝状的六边形区域取代四边形区域, 分别提出 GAF-h 和 ZBP 算法, 但这些算法需要配备 GPS 等设备收集节点的明确地理位置信息, ZBP

算法甚至需要严格的时间同步. 而文献 [5] 提出一种基于延迟约束的、高能效路由方法 DCEERP, 利用基站的定向天线以及基站的能量等级将目标区域划分为多个虚拟的网格区域, 建立以基站为中心的虚拟极坐标系统, 节点不必配备额外的定位设备.

另一方面, 对于大规模无线传感器网络, 由于节点数量众多, 一般采用分簇路由模型^[6] 组织网络. 分簇路由协议源于 LEACH^[7], 它将目标区域内的节点划分成多个簇, 每个簇选择一个簇头 (Cluster head, CH) 负责本簇节点及其数据的管理, 簇头的选择以及簇头在目标区域的分布情况至关重要, 关系到整个网络生命周期长短, 一般以节点剩余能量多少选择簇头, 比如 HEED^[8]、BCDCP^[9], 这两种算法在一定程度上也实现了簇头在区域内的均匀分布. 虽然剩余能量在选择簇头过程中地位重要, 但在复杂的环境下, 以剩余能量为簇头竞选的首要条件显得并不充分, 其他因素比如节点的地理位置信息同样举足轻重^[10]. 当剩余能量最多的节点集中在某一个区域, 则形成的簇并不是最优的, 簇成员到簇头的距离较远, 反而可能导致更多的能耗, 因此簇头节点的选择还应考虑节点在簇内的位置. 算法 HYENAS^[10]、EAREC^[11]、EECS^[12] 在选择簇头时包含了节点位置信息, 特别是 HYENAS 算法, 在定

收稿日期 2007-02-08 收修改稿日期 2007-07-12
Received February 8, 2007; in revised form July 12, 2007
华为高校科技基金 (YJCB2005011WL), 四川省科技攻关计划 (05G007-011-02) 资助
Supported by the High School Science-Technology Foundation of Huawei Corporation of China (YJCB2005011WL) and the Science-Technology Project of Sichuan Province of China (05G007-011-02)
1. 电子科技大学自动化工程学院 成都 610054 2. 四川大学电子信息学院 成都 610064
1. College of Automation, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054 2. College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610064
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2008.00743

位设备支持下,以成员节点到簇头节点的距离平方和以及簇头节点到基站的距离平方作为参数参与簇头的竞争过程,具有一定合理性,但算法采用基于基站的中心控制方式,大量信息短时间内浪涌般流向基站,容易造成网络拥塞,同时信号干扰的概率加大,当能量受限、环境动态变化时,这种远端基站的中心节点控制方式便不能胜任。

本文针对大规模无线传感器网络,以区域划分的思想解决 WSN 路由问题,提出一种并行、分布式、自组织的成簇协议 (Parallel distributed self-organization clustering protocol, PDSOCP)。协议采用中心控制和分布式控制相结合的组网模式,簇头竞选过程中既考虑了节点剩余能量因素,也引入了节点地理位置因素作为簇头选择的依据,数据通过“簇头—簇头”中继模式向远端基站发送。另外,在很多应用中,都需要知道采集的数据是来自哪个区域,没有位置信息的监测数据往往无法作为决策的参考,但在无线传感器网络的定位中,很多时候只关心诸如:“5 号区域现在温度是多少?”等非精确位置信息^[13],因此,不必通过复杂的算法和 GPS 等硬件设备获取节点的精确位置。本算法根据接收信号强度指示器 (Received signal strength indication, RSSI) 确定节点相对于两个基站的距离信息,通过简单的算法确定事件发生点所在的区域位置信息,不需配备 GPS 等设备。实验表明该算法具有比 BCDPC 等算法更高的能量效率,网络生命周期更长。

1 算法设计

1.1 网络模型和结构

本算法网络模型的相关属性描述如下:

1) 节点分布于平面区域,节点之间没有通信障碍,节点位置固定,各个节点配有功率控制单元,可以动态调节节点发射功率,节点初始能量随机分布。

2) 成员节点与簇头、簇头与簇头之间的通信满足自由空间通信模型^[7] $E = \varepsilon_{amp}d^p$,本算法中通信距离较近,取 $p = 2$ 。

3) 所有节点具有同等功能,并具有数据融合能力,节点通过 RSSI 监测接收信号强度,且灵敏度足够高。

4) 设立两个基站 (Base station, BS),分别位于目标区域同侧边界两端,且两 BS 之间的距离已知,如图 1。BS 通信能量不受限,通信功率离散可调。

1.2 无线通信模型

节点的能耗主要包括三个部分:传感器模块、处理器模块和无线通信模块,其中无线通信模块是主要的耗能点,本文无线通信模型采用文献 [7] 的自

由空间模型,如图 2 所示,无线通信模块包括无线发送、放大模块和无线接收模块,当传输 α bit 数据时,各个部分能耗满足下列关系:

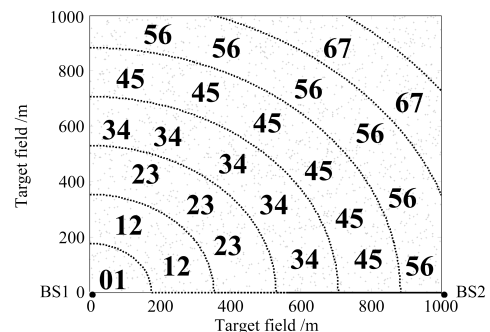
$$E_{Tx}(\alpha, d) = E_{elec}(\alpha) + E_{amp}(\alpha, d) = \alpha E_{elec} + \varepsilon_{amp} \alpha d^2 \quad (1)$$

$$E_{rx}(\alpha) = E_{elec}(\alpha) = \alpha E_{elec} \quad (2)$$

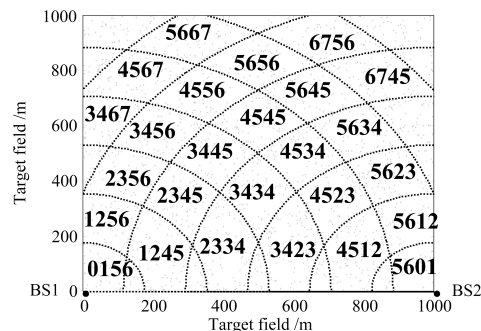
其中, $E_{Tx}(\alpha, d)$ 表示发送 α bit 数据到距离为 d 的接收端的能耗, E_{rx} 为接收 α bit 数据的能耗, $E_{elec}(\alpha) = 50n$ J/bit 为传输电路或者接收电路的能耗, $\varepsilon_{amp} = 10p$ J/bit/m² 为传输放大电路的能耗。设簇内节点数为 n ,则 CH 的能耗表达式为

$$E_{CH} = nE_{rx}(\alpha) + n\alpha E_{DA} + E_{Tx}(\alpha, d_{CH_CH}) \quad (3)$$

式中 E_{DA} 为数据融合的能耗,本文取值为 5n J/bit/signal, $E_{Tx}(\alpha, d_{CH_CH})$ 为两相邻 CH 之间传输 α bit 数据的能耗。 d_{CH_CH} 为当前 CH 和邻居 CH 的通信距离。本文假定无线信道是对称的,即从节点 a 传送消息 m 到节点 b 的能耗和从节点 b 传送消息 m 到节点 a 的能耗相等。



(a) 基于基站 1
(a) Based on BS1



(b) 两个基站共同形成的区域
(b) Based on two base stations

图 1 基于基站的区域代码信息

Fig. 1 The region code information based on base station

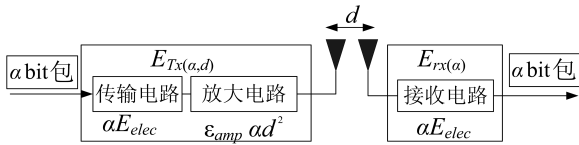


图 2 节点通信能耗

Fig. 2 The communication energy dissipation of node

1.3 分布式网络区域的形成

根据基站的通信覆盖范围, 通信能量可以划分为很多离散的功率等级, 功率越高通信覆盖范围越大, 反之越小, 据此可以将目标监测区域划分为很多相对独立的逻辑区域. 节点根据接收到的不同基站的信号强度可以近似确定自己到两个基站的距离, 从而确定自己所属的逻辑区域, 每个逻辑区域有自己独立的 ID, ID 获取方法如下:

在目标区域的边界设置两个基站, 其最大功率等级设为 τ , 两个基站 BS1、BS2 分别从 $1 \sim \tau$ 的离散功率等级向目标区域广播初始化消息 “initial”, 如图 1 (a), 初始化消息包括 < 基站编号 (ID)、能量等级 (Level)、发射功率 (Power)> 等, 如图 3. 每相邻的两个 “能量等级” 确定一个环状区域, 两个基站形成的环状区域相互交叉将目标区域划分为一系列格状网, 如图 1 (b). 每个网格内的节点解析来自两个基站 “initial” 消息的 “能量等级” 信息, 获得 4 位相同的区域 ID 号 (regionID), 其中基于 BS1 的 ID 在前, 基于 BS2 的在后, 如图 4. 所有区域 ID 号相同的节点形成一个区域, 比如 2356 代表一个距离 BS1 的带状环 23 和距离 BS2 的带状环 56 的交叉区域, 如图 1 (b). 在基于 $E = \epsilon_{amp} d^2$ 的自由空间通信模型的假设下, 调节基站通信能量以 τ^2 倍递增, 可以得到均匀分布的逻辑区域.

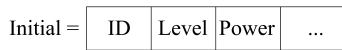


图 3 初始化消息格式

Fig. 3 Format of initial message



图 4 区域 ID

Fig. 4 Format of region ID

1.4 网络设置阶段

在区域划分的基础上, 各个区域开始独立形成簇, 互不干涉, 每个区域选择一个代理, 负责管理成簇过程, 节点只需向近距离的区域代理发送状态属性, 从而避免了通过网络重复传递动态信息到远端基站, 缩小通信代价. 同时各区域并行运行成簇算法, 大大缩短了网络初始化时间, 提高网络响应的快速性.

1.4.1 代理节点

为了把区域节点管理和数据处理分开, 在每个区域中选定一个代理节点 (agent). 代理是区域内相对独立的管理者, 负责簇头的选择、本区域内节点信息的管理, 它本身不参与监测数据的采集. 代理机制的引入分担了簇头的负担, 延长了簇头的任务周期, 使区域内节点管理和数据处理效率得以提高. 代理选择的方式为:

第一次选择 agent 时, 采用随机方式生成. 如果不是第一次选择该区域代理, 则由簇头负责触发代理的选举, 簇头通过心跳信息监测当前代理剩余能量, 如果剩余能量低于区域内平均剩余能量的某个百分比 (本文设为 50%), 则开始新代理的选举过程: 簇头选择区域内剩余能量最多的节点作为代理. 宣布为代理的节点广播 “hello” 消息, 通知区域内节点自己成为 agent, 只有区域代码和 agent 区域代码相同的节点才接收该消息. 收到消息后, 节点返回 < 自身 ID, 剩余能量, 接收到 BS1、BS2 的信号强度 > 数据包给代理, 宣布自己成为 agent 的成员节点. agent 维护一张区域数据表, 存放所辖区域内每个节点的 ID、剩余能量等信息, 并计算区域内平均剩余能量.

1.4.2 簇规划算法

1) 区域内节点相对坐标

agent 节点以接收 BS1 信号强度最大的节点为边界, 将其坐标定为 0, 表示该节点位于本区域内距离 BS1 最近的下边界, 该边界称为接收信号 “0 等强线”, 并视为 Y 坐标轴; 将接收信号强度最小的节点 (本区域内距离 BS1 最远) 所在的边界线定义为 “1 等强线”, 其坐标值定为 1, 其余节点根据接收信号强度大小分配 $0 \sim 1$ 的相对值, 表示其到上下边界的相对距离. 同理, 得到基于 BS2 的 “0 等强线” 和 “1 等强线”, 并视其 “0 等强线” 为 X 坐标轴, 节点得到基于此边界的相对坐标值. 这样, 区域内的每个节点得到一组基于 BS1 和 BS2 上下边界等强线的相对坐标值, 且基于 BS1 的等强线相对坐标值在前, 如图 5 (见下页), 节点 $a(0.7, 0.8)$ 表示节点 a 位于距 BS1 的 0 等强线 0.7 个单位, 距 BS2 的 0 等强线 0.8 个单位处, agent 将所有节点的坐标信息加入到区域数据表中.

2) 簇头选择

选定 agent 后, agent 即开始运行成簇算法, 选择 CH. 对于一个簇结构的网络, 簇头和簇内节点通信距离越小则其全局通信能耗越低, 即簇头到成员节点距离平方和越小, 则该节点越具有成为簇头的优良地理位置. 除了节点所处地理位置, 剩余能量显得更加重要, 只有剩余能量高的节点才能有效承担高

强度的数据处理任务. 本文提出的簇头选择算法中不仅考虑了节点剩余能量信息, 也引入节点地理位置信息作为簇头竞争的重要参数, agent 通过节点竞争能力表达式 p_i 确定簇头节点

$$p_i = \omega \frac{E_{ri} - \bar{E}}{\bar{E}} + (1 - \omega) \left(1 - \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} \sigma_{ij}^2 \right) \quad (4)$$

其中 $i \in (1, n)$, 且 $j \neq i$, $\omega \in (0, 1)$ 为权值, 表示能量信息和距离信息对节点竞争簇头的影响程度, E_{ri} 为节点的剩余能量, \bar{E} 表示簇内平均剩余能量, 第 i 个节点到区域内第 j 个节点的距离用 σ_{ij} 表示 ($i, j \in (1, n), i \neq j$).

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{ri} \quad (5)$$

$$\sigma_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (6)$$

agent 根据每个节点的竞争强度 p_i 值, 选择其中最大者作为簇头. 簇头确定后, agent 查询节点坐标, 计算 CH 节点到最远节点的距离 d_{CH_node} , 并将 d_{CH_node} 发送给选定的簇头, CH 根据收到的 d_{CH_node} 值, 动态调节其发射功率, 以覆盖区域内所有节点. 然后 CH 向本区域广播消息, 宣布自己成为簇头, 收到该消息的本区域节点根据接收到的信号强度设定自己和 CH 的通信功率, 并向 CH 发送 Join_REQ (Join-request) 消息, 宣布加入该簇.



图 5 节点相对坐标

Fig. 5 The relative coordinates of nodes

1.5 稳定通信阶段

稳定通信包括成员节点和 CH 之间, CH 和邻居 CH 之间的信息交互两个方面.

1.5.1 成员节点和 CH 之间通讯

成员节点向 CH 发送的数据主要包括: 传感器采集的信息、节点剩余能量、节点 ID 等, 为避免数据冲突, 簇头基于 TDMA (Time-division multiple-access) 的低能耗 MAC 协议^[14] 给本区域代理、每个成员节点分配通讯时槽, 只有在自己的时槽内, 节点才打开无线发送模块和 CH 节点通信, 其余通讯时槽内此模块一直处于关闭状态, 从而节省能量. 另

外, 由于节点通讯采用广播方式, 因此节点在和自己的 CH 通信时, 其余邻居簇的节点也可能接收到此信息, 为避免簇间干扰, 每个簇在通讯过程中都使用区域代码为唯一的通讯标识码, 节点根据该编码过滤掉收到的非本簇信息. 但另一方面, 应允许簇头接收邻居簇头转发过来的数据信息, 本算法通过在数据包中绑定数据类型标识实现. CH 节点收到来自成员节点的监测信息后将数据进行融合处理, 形成数据包, 并计算本簇节点平均剩余能量. 数据包主要由一跳簇头区域 ID (CH region ID, CHRID)、原始数据区域 ID (Original data region ID, ODRID)、数据采集时间 (Time) 以及监测数据 (Data) 等部分构成, 如图 6. 其中 ODRID 绑定数据源所属的区域代码 (用于定位数据源), 另外, 为了获取数据采集时间, 基站定时以覆盖全网的最大功率广播时间同步消息, 节点根据收到的信息同步当前时间.

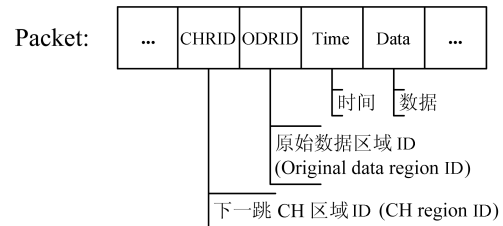


图 6 数据包格式

Fig. 6 The format of data packet

1.5.2 CH-CH 之间通讯

CH 节点通讯覆盖范围应至少达到邻居 CH, 而邻居区域内 CH 的分布既可能在区域中央, 也可能位于区域最边缘, 如果采用 GAF 中设置的节点通信半径, 则有 2.3% 的节点不可达^[3], 使网络连通性受到影响. 本算法中设每个区域近似为边长 r 的正方形^[4], 考虑最坏的情况, 相邻区域内的簇头都位于各自区域的远端边缘, 如图 7 (见下页), 则相邻区域簇头通讯的最小覆盖范围 d_{CH_CH} 为

$$2\sqrt{r^2 + r^2} \leq d_{CH_CH}$$

即

$$d_{CH_CH} \geq 2\sqrt{2}r \quad (7)$$

簇头节点调节自己发射功率以覆盖半径为 d_{CH_CH} 的通讯区域.

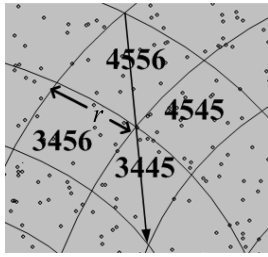


图 7 簇头通信半径设定

Fig. 7 The communication radius of CH

1.5.3 CH 路由算法

在本算法中 CH 不直接和远端 BS 通讯, 而是通过邻居 CH 以多跳方式向 BS 发送, 其路由算法(如图 8) 包括以下步骤:

1) 选择接收数据的基站: 簇头节点根据区域代码 regionID 前两位和后两位的大小来判断数据向哪个基站传递. 如果前两位小于后两位, 则说明簇头距 BS1 较 BS2 更近, 能耗更小, 则簇头选择 BS1 为数据传送的最终目标点, 否则选择 BS2; 如果前后两位相等, 则说明向任意基站传送能耗相当, 此时簇头随机选择数据传送方向. 例如 regionID = 4556, 前两位小于后两位, 则数据向 BS1 传送, 如图 1(b).

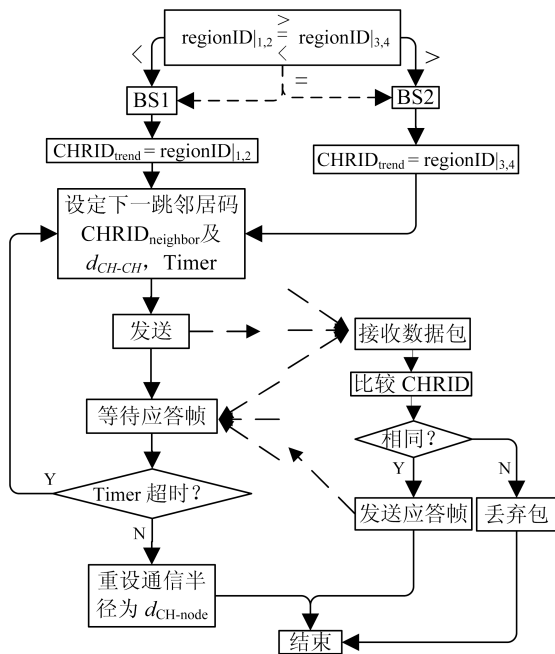


图 8 CH-CH 路由

Fig. 8 The format of data packet

2) 簇头在数据包中加载下一跳簇头区域 ID (CHRID), 见图 6, CHRID 由“方向码 (CHRID_{trend})”+“邻居码 (CHRID_{neighbour})”构成, 按以下算法设定:

方向码: 根据选定的基站, 确定使用区域代码的前两位还是后两位作为路由方向的依据, 选定的两位区域代码称为方向码, 用于表示路由方向是向 BS1 还是 BS2. 如果数据朝基站 1 传送, 则取区域代码前两位作为方向码, 否则取后两位. 设当前簇头方向码为 CHRID_{trend} = (x, x + 1), 则下一跳目标簇头所在的区域方向码为 CHRID_{trend} = (x - 1, x).

邻居码: 除了方向码的剩余两位区域代码称为路由的邻居码, 它和方向码一起共同定位下一跳邻居簇头所在的区域. 如果当前区域邻居码为 (y, y + 1), 则下一跳邻居代码在以下 3 个值中随机选择一个: (y - 1, y), (y, y + 1), (y + 1, y + 2), 这三个代码是近基站侧相邻区域的邻居码, 路由的目的簇头区域代码由“方向码”和“邻居码”共同形成.

3) 簇头调节发送功率使其覆盖半径为 d_{CH,CH} 的通信区域, 设定发送超时定时器 (Timer), 并绑定“数据类型代码”, 以表示此数据包为路由数据, 以免被邻居簇头过滤掉. 然后发送数据包, 并等待确认信息.

4) 在定时时间内, 簇头收到确认信息, 则发送过程结束, 簇头恢复通信半径为 d_{CH,node}, 否则若定时器溢出, 转 2), 如图 8.

5) 邻居簇头收到数据包后, 解析数据包中的 CHRID, 如果和本簇头区域代码相同则保存数据, 发送应答信息, 确认本次通信成功, 否则丢弃数据包.

6) 路由上新的簇头节点重复 2) 直到区域代码中的方向码为 01, 即 CHRID_{trend} = 01, 表示数据包到达距离基站一跳的位置, 则该簇头直接向相应基站发送数据, 并结束本次数据通讯过程. 数据到达基站后, 基站解析数据包中 ODRID 的内容即可获取事件发生点的区域代码, 决策者可根据区域代码信息, 确定事件发生点和两个基站之间的距离, 由于两基站彼此之间距离为已知, 由“三边测量法”^[15] 很容易确定事件发生点的地理位置, 为决策者提供更有价值的参考.

1.6 区域管理

agent 和 CH 之间互发心跳信息^[16] 以确认彼此的状态. 簇头在最后一个通讯时槽结束后, 立即向 agent 通报本簇每个节点当前剩余能量、CH 自身剩余能量等信息, 为避免簇头节点频繁更替, 保障簇头身份的稳定性, 规定 CH 剩余能量低于簇平均剩余能量的某个百分比, 或者 agent 检测到 CH 无法再和本簇成员、邻居 CH 通信, 则说明该节点不再胜任充当 CH, 于是 agent 发起新一轮的 CH 竞选过程.

另一方面, agent 在每个自己的通讯时槽内向簇头发送其本身的剩余能量, 同样, 为保证代理节点身

份的稳定性,规定如果代理节点剩余能量低于簇平均剩余能量某个百分比,则说明该节点不再适合充任代理,于是簇头发起新一轮代理竞选过程.另外,如果簇头和代理因不可抗拒因素突然失效,心跳计时器没有收到对方的心跳信息,则任一方也可发起对方的新一轮竞选过程.这样,通过 agent 和 CH 之间的心跳机制,任何一方可以监测对方的状态,并可根据得到的状态信息进行合理决策,增强了区域管理的可靠性,系统鲁棒性也得以提高.

2 优化区域数

将目标区域划分为一个个小的逻辑区域可以缩小数据通信距离,提高能效,同时各个区域并行运行成簇算法,也使网络响应速度得以提高.但是区域数量的多少直接影响簇的数量和大小,根据目标区域面积、节点数量等参数来优化区域数量是提高系统整体性能的必然要求.

设有 N 个节点部署于面积为 $M \times M$ 的正方形目标区域中,目标区域被划分为 k 个逻辑小区域,平均每个区域节点数设为 N/k 个,主要的能耗点包括:每个簇头接收簇成员的数据、融合数据、发送数据给邻居簇头 (E_{CH});成员节点发送数据给簇头 (E_{non_CH});各簇头的路由能耗 (E_{CH_CH}).

设每个数据包包含 α 比特数据,由式 (1) ~ (3),则每个簇头的能耗表达式为

$$E_{CH} = \alpha E_{elec} \left(\frac{N}{k} - 1 \right) + \alpha E_{DA} \frac{N}{k} + \alpha E_{elec} + \alpha \varepsilon_{amp} d_{CH_CH}^2 \quad (8)$$

如图 7, r 为逻辑区域边长,则

$$r = \frac{M}{\sqrt{k}} \quad (9)$$

令

$$d_{CH_CH} = 2\sqrt{2}r \quad (10)$$

设 d_{toCH} 表示簇成员节点到簇头的通信距离,则每个簇内节点和本簇簇头通信能耗为

$$E_{non_CH} = \alpha E_{elec} + \alpha \varepsilon_{amp} d_{toCH}^2 \quad (11)$$

假设簇内节点均匀分布,则 d_{toCH}^2 的数学期望 $E(d_{toCH}^2)$ 为^[17]

$$E(d_{toCH}^2) = \frac{M^2}{2\pi k} \quad (12)$$

因此在一个簇内能耗 $E_{cluster}$ 为

$$E_{cluster} = E_{CH} + \left(\frac{N}{k} - 1 \right) E_{non_CH} \approx E_{CH} + \frac{N}{k} E_{non_CH} \quad (13)$$

路由能耗 E_{CH_CH} 表示为

$$E_{CH_CH} = \alpha E_{elec} + \alpha E_{elec} + \alpha \varepsilon_{amp} d_{CH_CH}^2 \quad (14)$$

各簇头的路由能耗 (E_{CH_CH}) 主要指簇头接收邻居簇头的的数据并转发给路由方向的邻居簇头时的能耗,假设两个基站有 $\tau \times \tau$ 个离散功率等级,将目标区域化分为 k 个小区域(为方便分析,假设 $\tau \times \tau \approx k$),如图 1(b),并设每个环形区域有 τ 个小区域,有 $\tau/2$ 个区域路由方向为 BS1,另 $\tau/2$ 个区域路由方向为 BS2,最靠近基站的内环(环 1)直接和基站通信,为简单起见,设其通信距离仍为 d_{CH_CH} .环 2 中区域通过 1 跳到基站,环 3 中区域则通过 2 跳到基站,……,环 τ 通过 $(\tau - 1)$ 跳到基站,如表 1. 则路由中的总跳数 ψ 为

$$\psi = \frac{\tau(\tau - 1)}{2} \cdot \frac{\tau}{2} \cdot 2 = \frac{k(\sqrt{k} - 1)}{2} \quad (15)$$

表 1 路由跳数

Table 1 The number of route hops

环	每个区域路由跳数	区域数
2	1	$\tau/2$
3	2	$\tau/2$
...	...	$\tau/2$
τ	$\tau - 1$	$\tau/2$

若每个簇采集 α bit 数据,由式 (8) ~ (15),系统总能耗 E_{total} 为

$$\begin{aligned} E_{total} &= k E_{cluster} + \psi E_{CH_CH} = \\ &k \left(\alpha E_{elec} \left(\frac{N}{k} - 1 \right) + \alpha E_{DA} \frac{N}{k} + \alpha E_{elec} + \right. \\ &\left. \alpha \varepsilon_{amp} d_{CH_CH}^2 \right) + k \cdot \frac{N}{k} \left(\alpha E_{elec} + \alpha \varepsilon_{amp} d_{toCH}^2 \right) + \\ &\frac{k(\sqrt{k} - 1)}{2} \left(2\alpha E_{elec} + \alpha \varepsilon_{amp} d_{CH_CH}^2 \right) = \\ &2\alpha N E_{elec} + \alpha N E_{DA} + 8\alpha \varepsilon_{amp} M^2 + N \alpha \varepsilon_{amp} \frac{M^2}{2\pi k} + \\ &(\sqrt{k} - 1) \left(\alpha E_{elec} k + 4\alpha \varepsilon_{amp} M^2 \right) \end{aligned} \quad (16)$$

上式对 k 求导,并令 $dE_{total}/dk = 0$ 得

$$\begin{aligned} 3\pi\alpha E_{elec} k^{\frac{5}{2}} - 2\pi\alpha E_{elec} k^2 + \\ 4\pi\alpha M^2 \varepsilon_{amp} k^{\frac{3}{2}} - \alpha N \varepsilon_{amp} M^2 = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

当 $\alpha = 500$ bit, $N = 1000$, $M = 500$ m, 则 $k_{opt} \approx 16$, 即方圆 500 m 的目标区域被划分为 16 个逻辑区域;对于更大规模无线传感器网络,设区域边长 $M = 1000$ m,节点数 $N = 5000$ 时,则最优区域数为 $k_{opt} \approx 49$,即目标区域划分为 49 个簇.

3 实验分析

在本实验中, 采用 Matlab 进行系统仿真, 设有 5000 个节点, 随机部署于 1000 m×1000 m 的平面目标区域, 初始能量在 4 J ~ 5 J 之间随机设置, 数据包长度为 500 bit, 基站 1 位置坐标为 (0, 0), 基站 2 位置坐标为 (1000, 0). 基站以离散功率广播信息, 将目标区域划分为各个逻辑小区域.

区域数 (簇数) 设为 50, 改变簇头竞选过程中的权值 ω , 观察系统运行的轮数. 如图 9, 以样本 1 为例, 随着 ω 从小到大变化, 系统运行轮数从 3.11×10^4 下降到 2.59×10^4 , 降低了 16.7%, 转折点在 $\omega = 0.74$ 附近. 当 ω 较小时, 位置信息在簇头选择过程中相对更重要, 则选出来的簇头到簇内成员平均距离更小, 每轮通信能耗低, 生命周期更长; 当 ω 变大, 超过 0.74 时, 则节点剩余能量信息比节点位置信息在簇头选择中占据更大份量, 选择的簇头主要考虑了剩余能量信息, 当 $\omega = 1$ 时, 簇头的竞选就只考虑剩余能量信息, 类似于 BCDP^[9] 算法, 但由于此时选择的簇头节点到其余节点的距离平方和并不是最优的, 即通信开销没有得到优化, 因此每轮能耗增加, 系统生命周期反而减小. 实验也进一步说明了在簇头节点选择过程中簇头所处的位置对通信能耗的影响是不能忽略的, 仅仅靠剩余能量信息选择簇头无法获得优良的能量效率. 由于不同实验样本中节点初始能量分布不同, 获得的实验性能稍有差别, 但总的趋势不变, 都是在 ω 较小时系统运行轮数更大.

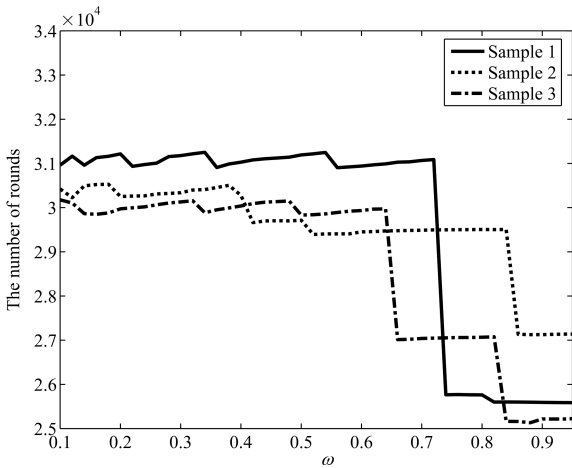


图 9 系统运行时间与权值 ω 的关系

Fig. 9 Relationship between system lifetime and ω

取 $\omega = 0.8$, 进一步考察逻辑区域数 (簇数量) 对系统运行时间的影响, 图 10 为系统稳定运行轮数同区域数量 (簇数量) k 的变化关系图. 当划分的区域数较少和较多时, 系统稳定工作的轮数都偏低, 区

域数在 45 ~ 55 范围内系统运行时间更长. 在目标区域面积和节点总数不变的情况下, 划分的区域数量少, 则每个区域内面积大, 节点数量多, 簇头节点及代理节点负荷过重, 容易过快死亡, 导致簇头不断更替, 稳定工作时间短. 同时成员节点到簇头平均通信距离远, 系统全局能耗大, 节点死亡率高. 相反, 当区域数量比较大时, 每个区域面积小, 形成的簇成员数少, 虽然节点相互距离较近, 簇内通信能耗低, 但由于形成的簇数量过大, 簇头需要转发的邻居簇头的数据包增多, 簇间通信负荷增加, 路由开销加大, 簇内通信所节省的能耗不足以平衡簇间通信的大量能量开支, 因此系统运行时间缩短. 区域数在 45 ~ 55 之间, 系统获得簇内和簇间通信能耗的良好平衡, 系统稳定工作时间长.

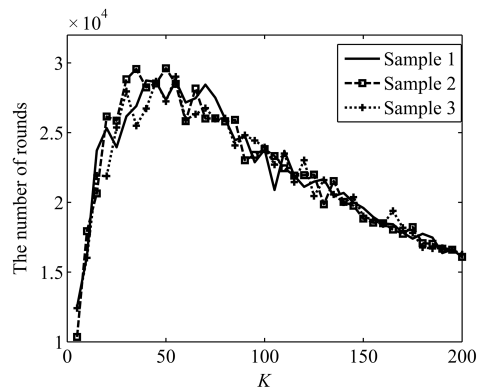


图 10 系统运行时间与区域 (簇) 数 k 的关系

Fig. 10 Relationship between system lifetime and k

定义网络生命周期为从网络开始工作时刻起到第一个网络节点死亡那一刻的时间跨度^[18], 且如果剩余能量降为初始平均剩余能量的 10%, 则视为节点死亡. PDSOCP 与 BCDP^[9] 算法生命周期比较情况见图 11 (见下页), PDSOCP 第一个死亡节点出现在 2.08×10^4 轮, 而 BCDP 出现在 1.6×10^4 轮, PDSOCP 较 BCDP 生命周期提升 30% 左右. 这主要是 BCDP 选择的簇头仅仅考虑节点剩余能量, 没有考虑节点位置的合理性, 所形成的簇平均通信距离偏大, 因此每轮能耗较高, 图 12 为 PDSOCP 与 BCDP 平均每轮能耗的比较情况.

定义数据延迟为全网所有源即目的节点对发送数据包和接收数据包之间的平均时间差^[2, 11]. 当簇数量较少的时候, PDSOCP 延迟并不占优势, 但当簇数量超过 25 左右, PDSOCP 表现出更小的平均数据延迟, 如图 13. 这是因为在稳定通信阶段, BCDP 的各个簇头节点形成连通的路由树 (最小生成树), 并在树上随机选择一个节点作为向 BS 发送数据的头节点. 此过程各个树枝上的节点数据可以并行传输到头节点, 从而在稳定通信阶段, 数据延

迟较小. 但是, 随着网络的运行, 旧的簇头节点失效, 新簇头节点被选出, 网络拓扑发生一定变化, BS 需要花费大量时间来收集节点信息并重构一个新的路由树, 当簇数量较少, 路由树的建立耗时较少, 而当簇数量比较大的时候, 此过程耗时较长, 因此总体平均延迟高于 PDSOCP.

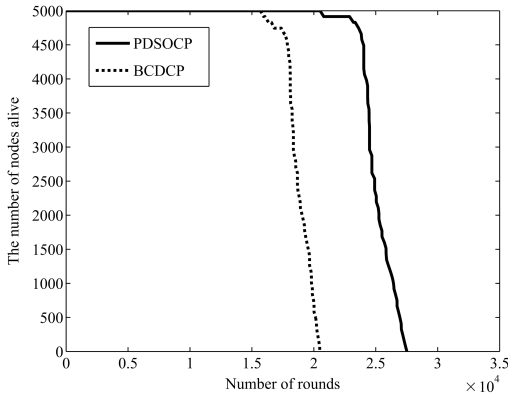


图 11 生命周期比较

Fig. 11 Comparison of system lifetime

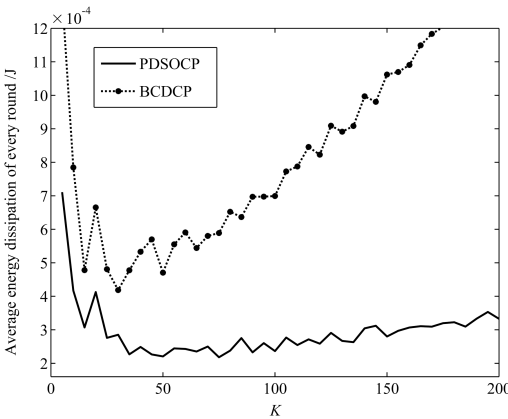


图 12 平均能耗比较 (J)

Fig. 12 Comparison of average energy dissipations (J)

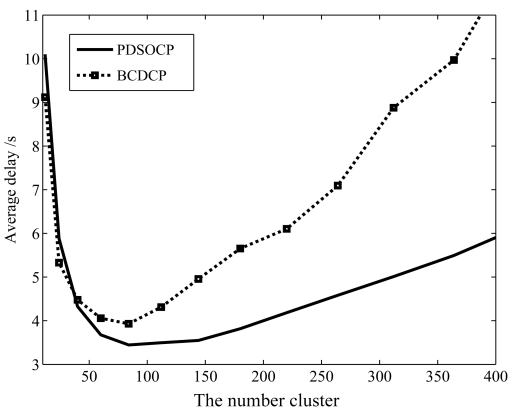


图 13 延迟比较

Fig. 13 Comparison of delays

另外, 从整个目标区域的全局来看, PDSOCP 将目标区域划分为各个均匀分布的逻辑区域, 每个区域形成一个簇, 并引入节点位置合理性作为簇头竞选的参数, 形成的簇头在目标区域内分布较均匀, 也从整体上节省了系统能量, 获得更高的生命周期. 图 14 为某个仿真时刻目标区域内簇头的分布情况, 可见 PDSOCP 很容易实现簇头节点在区域内的均匀分布.

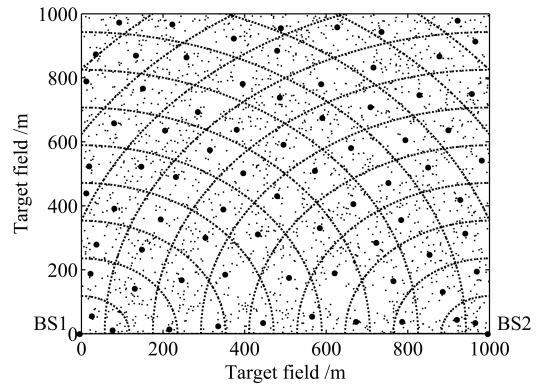


图 14 某时刻目标区域内簇头分布情况

Fig. 14 The deployment of CH in a certain time

4 结论及下一步工作

分簇协议的目的是要利用节点有限的资源, 完成高效的数据传输任务, 延长网络的使用寿命, 提高节点的能效, 并保证一定的灵活性、鲁棒性. 在 PDSOCP 协议中, 采用“分而治之”策略将大目标区域分成多个并行工作的小逻辑区域, 缩短节点单跳通信距离, 减少通信能耗. 协议以簇头和区域代理的彼此监控机制提高系统的鲁棒性, 以剩余能量和簇头位置信息竞选簇头的机制, 提升簇头选择的合理性, 以区域代码控制路由方向增强路由灵活性, 缩减路由对全局信息的依赖程度. 但是 PDSOCP 算法还有很多待解决的问题, 比如算法对网络环境动态变化的适应性问题 (节点移动性、通信状态的变化等), 簇的自适应重构、容错性、鲁棒性问题, 而且负载均衡只在网络各个区域内部实现, 未能在全局范围内考虑, 下一步将在这些方面对算法进行进一步的优化.

References

- 1 Xu Y, Heide J, Estrin D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In: Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Rome, Italy: ACM, 2001. 70–84
- 2 Ye F, Luo H Y, Cheng J, Lu S W, Zhang L X. A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks. In: Proceedings of the 8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Atlanta, USA: ACM, 2002. 148–159

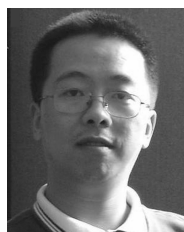
- 3 Liu R P, Rogers G, Zhou S H. Honeycomb architecture for energy conservation in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2006 IEEE Global Telecommunications Conference. San Francisco, USA: IEEE, 2006. 1–5
- 4 Chang C Y, Shih K P, Lee S C. ZBP: a zone-based broadcasting protocol for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Fukuoka, Japan: IEEE, 2004. 84–89
- 5 Pothuri P K, Sarangan V, Thomas J P. Delay-constrained, energy-efficient routing in wireless sensor networks through topology control. In: Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. IEEE, 2006. 35–41
- 6 Ibrqi J, Mahgoub I. Cluster-based routing in wireless sensor networks: issues and challenges. In: Proceedings of the 2004 International Symposium on Performance Evaluation of Computer Telecommunication Systems. San Jose, USA: ACM, 2004. 759–766
- 7 Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii, USA: 2000. 10–19
- 8 Younis O, Fahmy S. Heed: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for Ad Hoc sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2004, **3**(4): 366–379
- 9 Muruganathan S D, Ma D C F, Bhasin R I, Fapojuwo A O. A centralized energy-efficient routing protocol for wireless sensor networks. *IEEE Radio Communication Magazine*, 2005, **43**(3): 8–13
- 10 Tillapart P, Thumthawatworn T, Pakdeepinit P. Method for cluster heads selection in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2004 IEEE Aerospace Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2004. 3615–3623
- 11 Eimon A R A, Hong C S, Suda T. EAREC: energy aware routing with efficient clustering for sensor networks. In: Proceedings of the 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference. Las Vegas, USA: IEEE, 2006. 330–335
- 12 Ye M, Li C F, Chen G H, Wu J. EECS: an energy efficient cluster scheme in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 24th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference. Phoenix, Arizona, USA: IEEE, 2005. 535–540
- 13 Shah R C, Rabaey J M. Energy aware routing for low energy Ad Hoc sensor networks. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Orlando, USA: IEEE, 2002. 350–55
- 14 Clare L P, Pottie G J, Agre J R. Self-organizing distributed sensor networks. In: Proceedings of International Conference on Society for Optical Engineering. Orlando, USA: IEEE, 1999. 229–237
- 15 Sun Li-Min, Li Jian-Zhong. *Wireless Sensor Networks*. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 137–138 (孙利民, 李建中. 无线传感器网络. 北京: 清华大学出版社, 2005. 137–138)
- 16 Yin Kang-Kai, Wang Ming-Wei, Li Shan-Ping. Study of multi-node heartbeat model used in HA cluster. *Computer Engineering*, 2005, **31**(15): 102–103, 106 (尹康凯, 王明伟, 李善平. 高可用性集群中多个节点的心跳模型研究. 计算机工程, 2005, **31**(15): 102–103, 106)
- 17 Heinzelman W R, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, **1**(4): 660–670
- 18 Liu J S, Lin R C H. Energy-efficiency clustering protocol in wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2005, **3**(3): 371–388



闫 斌 电子科技大学博士研究生. 主要研究方向为无线传感器网络路由、数据融合. 本文通信作者.

E-mail: uestyan@163.com

(YAN Bin Ph.D. candidate at University of Electronic Science and Technology of China. His research interest covers routing and data fusion of wireless sensor networks. Corresponding author of this paper.)



周小佳 电子科技大学副教授. 主要研究方向为无线传感器网络、电力系统自动化. E-mail: zhouxj@uestc.edu.cn

(ZHOU Xiao-Jia Associate professor at University of Electronic Science and Technology of China. His research interest covers wireless sensor networks and automation of electric power systems.)



王厚军 电子科技大学教授. 主要研究方向为无线传感器网络、分布式测试.

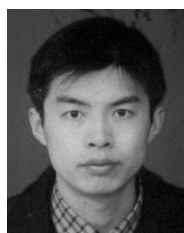
E-mail: hjwang@uestc.edu.cn

(WANG Hou-Jun Professor at University of Electronic Science and Technology of China. His research interest covers wireless sensor networks and distributed detection.)



郎方年 四川大学博士研究生. 主要研究方向为数字图像处理、生物特征识别以及人工智能. E-mail: fnlang@163.com

(LANG Fang-Nian Ph.D. candidate at the Sichuan University. His research interest covers digital image processing, biology feature recognition, and artificial intelligence.)



李本亮 电子科技大学博士研究生. 主要研究方向为数据融合、无线局域网.

E-mail: chnlbliang@163.com

(LI Ben-Liang Ph.D. candidate at University of Electronic Science and Technology of China. His research interest covers data fusion and WLAN.)