

一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议

李成法¹⁾ 陈贵海¹⁾ 叶懋¹⁾ 吴杰²⁾

¹⁾(南京大学软件新技术国家重点实验室 南京 210093)

²⁾(美国佛罗里达大西洋大学计算机科学与工程系 佛罗里达波卡雷顿 33431)

摘 要 在路由协议中利用分簇技术可以提高无线传感器网络的可扩展性. 当簇首以多跳通信的方式将数据传输至数据汇聚点时, 靠近汇聚点的簇首由于转发大量数据而负载过重, 可能过早耗尽能量而失效, 这将导致网络分割. 该文提出一种新颖的基于非均匀分簇的无线传感器网络多跳路由协议. 它的核心是一个用于组织网络拓扑的能量高效的非均匀分簇算法, 其中候选簇首通过使用非均匀的竞争范围来构造大小不等的簇. 靠近汇聚点的簇的规模小于远离汇聚点的簇, 因此靠近汇聚点的簇首可以为簇间的数据转发预留能量. 模拟实验结果表明, 该路由协议有效地平衡了簇首的能量消耗, 并显著地延长了网络的存活时间.

关键词 无线传感器网络; 能量高效; 非均匀分簇; 路由; 多跳通信

中图法分类号 TP393

An Uneven Cluster-Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks

LI Cheng-Fa¹⁾ CHEN Gui-Hai¹⁾ YE Mao¹⁾ WU Jie²⁾

¹⁾(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093)

²⁾(Department of Computer Science and Engineering, Florida Atlantic University, Boca Raton, FL 33431 USA)

Abstract Employing clustering techniques in routing protocols can increase the scalability of wireless sensor networks. When cluster heads transmit their data to the data sink via multi-hop communication, the cluster heads closer to the sink are burdened with heavy relay traffic and tend to die early, causing network partitions. This paper presents a novel uneven cluster-based routing protocol for wireless sensor networks. Its core is an Energy-Efficient Uneven Clustering (EEUC) algorithm for network topology organization, in which tentative cluster heads use uneven competition ranges to construct clusters of uneven sizes. The clusters closer to the sink have smaller sizes than those farther away from the sink, thus the cluster heads closer to the sink can preserve some energy for the inter-cluster data forwarding. Simulation results show that the routing protocol effectively balances the energy consumption among cluster heads and achieves an obvious improvement on the network lifetime.

Keywords wireless sensor networks; energy efficient; uneven clustering; routing; multi-hop communication

1 引 言

随着微电子工艺和无线通信技术的飞速发展,

无线传感器网络的研究越来越受到人们的重视. 传感器网络是由部署在观测环境内的大量微型传感器节点通过无线通信方式组成的一种无线网络. 组成传感器网络的节点包括数据汇聚点和传感器节点.

收稿日期:2005-09-27;修改稿收到日期:2006-04-24. 本课题得到国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2006CB303004)、国家自然科学基金基金(60573131,60673154)、江苏省自然科学基金(BK2005208)和教育部高校青年教师奖励基金资助. 李成法,男,1981年生,硕士研究生,研究方向为无线传感器网络. 陈贵海,男,1963年生,教授,博士生导师,研究领域为网络计算、组合数学等. E-mail: gchen@nju.edu.cn. 叶懋,男,1981年生,硕士研究生,研究方向为对等计算、传感器网络. 吴杰,男,1960年生,博士,教授,研究领域为无线网络与移动计算、并行与分布式系统等.

传感器节点通常是由能量十分有限的电池供电,而且在部署后难以二次补充能量,因此传感器网络存在严重的能量约束问题.所以,传感器网络协议的首要设计目标就是要高效地使用传感器节点的能量,延长网络的存活时间.

传感器节点中消耗能量的模块有传感器模块、处理器模块和无线通信模块等,其中无线通信消耗了大部分的能量^[1].基于分簇的层次式路由方法在提高网络的可扩展性方面特别有效.在以分簇方式组织的传感器网络中,传感器节点的角色分为簇首和簇成员两种.簇首作为簇的中心负责簇结构的建立,收集簇成员的数据,经融合^[2]处理后发送给汇聚点.由于簇首距离汇聚点的距离一般较远,已有研究(如文献^[3]等)表明在簇首与汇聚点之间通信时采取多跳的方式(即通过簇首组成的骨干网实现多跳路由)更有利于节约能量.然而这种做法带来了一个能量消耗不均衡的问题:在这种所有传感器节点的数据都发送到汇聚点的“多对一”数据传输模式中,靠近汇聚点的节点由于需要转发大量来自其它簇的数据而负担过重,过早耗尽自身能量而失效,造成网络分割,降低网络存活时间.研究者称这个问题为“热区”(hot spots)问题.

本文设计并分析了一种新颖的基于分簇的传感器网络路由协议,其核心是一个能量高效的非均匀分簇(Energy-Efficient Uneven Clustering, EEUC)算法^[4].路由的组织分为簇内通信和簇首与汇聚点间通信两部分:簇内通信采用单跳的方式,简单易实现;簇首与汇聚点间通信采用多跳的方式,避免长距离数据传输造成能量浪费. EEUC 算法利用非均匀的竞争半径,使得靠近汇聚点的簇的成员数目相对较小,从而簇首能够节约能量以供数据转发使用,达到均衡簇首能量消耗的目的.此外,在簇首选择其路由的下一跳节点时,不仅考虑候选节点相对汇聚点的位置,还考虑候选节点的剩余能量.实验结果表明,该路由协议有效地解决了多跳通信方式下簇首能量消耗不均衡的问题,优化了网络中各节点的能量消耗,显著地延长了网络的存活时间.

本文第 2 节介绍相关工作;第 3 节给出网络的模型,并讨论能量消耗的不均衡问题;第 4 节全面阐述 EEUC 算法和簇间的多跳路由算法;第 5 节对 EEUC 算法的性质进行了分析;第 6 节通过实验分析了该路由协议的性能;最后是工作总结和对未来工作的展望.

2 相关工作

近年来,研究人员提出了多种传感器网络的分簇协议^[5-12].Heinzelman 等人提出一种称为 LEACH 的分簇协议^[5].在每个数据收集的周期(一个周期也称为一轮)开始,一小部分节点随机成为簇首.在数据传输阶段,簇首以单跳通信的方式将融合后的数据传输给汇聚点.为了提高簇的生成质量,Heinzelman 等人又提出了集中式的簇构造算法 LEACH-C 以及考虑节点能量的算法(本文称其为 LEACH-E)^[6].Lindsey 等人提出的 PEGASIS 算法将网络中的节点组织为链状,数据在链上经融合处理,最后传输至汇聚点^[7];算法需要知道每个节点的位置信息.Dasgupta 等人提出一种基于分簇的启发式算法来最大化网络的存活时间,算法需要知道节点的位置信息和能量信息^[8].Choi 等人提出两阶段分簇协议 TPC,在簇内构造多跳路由链路以节约能量^[9].Younis 等人提出一种混合式的分簇协议 HEED^[10].算法首先根据节点的剩余能量来概率性地选取一些候选簇首,然后以簇内部通信代价的高低来竞争产生最终簇首.与 LEACH 不同的是,它的簇生成算法需要在簇半径内进行多次消息迭代,由此带来的通信开销比较显著.上述的这些协议均通过周期性地重新分簇,让节点轮流担任簇首,来达到网络中的节点比较均衡地消耗能量的目的.

然而,从均衡节点的能量消耗以延长网络的存活时间这个目标看,先前的研究主要集中于均衡簇成员节点之间的能量消耗,没有考虑到簇首间的能量消耗均衡问题.Soro 等人研究了传感器网络多跳路由中的“热区”问题,并首次提出利用非均匀分簇的思想来解决这个“热区”问题^[11].文中所假设的网络拓扑是环绕汇聚点的两层同心圆环,内圆环中的簇首由于靠近汇聚点,需要承担数据转发的任务,因此通过减小它的簇成员数目来降低其在簇内处理中消耗的能量,为簇首间数据转发预留能量.但是他们考虑的是一个异构网络,簇首为超级节点,而且位置是事先计算好的,无需动态构造簇的操作.在单跳通信的网络中,由于簇首距离汇聚点远近的差异,也存在簇首负载不均衡的问题.在我们的先前工作 EE-CS^[12]中,节点在选择簇首时不是简单地选择距离自身最近的簇首,而是考虑了候选簇首到汇聚点的距离远近,构造出大小非均匀的簇,均衡簇首的负载.

由于传感器网络与移动自组网络在应用场景上

有较大差别,需要为传感器网络设计优化的路由协议. Intanagonwiwat 等人提出的定向扩散协议是一种基于查询的路由机制^[13]. 汇聚点发出查询消息,形成反向的从数据源到汇聚点的数据传输梯度. 数据沿着梯度传送到汇聚点. Schurgers 等人提出了定向扩散的一个变种即基于梯度的路由算法 GBR,并设计了三种动态调整节点梯度的策略,以实现均衡的流量分布^[14]. 然而这些查询或事件驱动的协议都不适用于连续性数据收集场景下的“多对一”数据传输,因此也不适合在簇首间进行数据转发使用.

与已有的研究工作相比较,本文提出的分簇协议具有下列创新之处:(1)首次提出一个非均匀分簇的分布式算法,来解决传感器网络多跳路由中的“热区”问题.(2)不同于 LEACH,簇首通过局部竞争的方式产生,而且不同于 HEED,算法无需迭代.(3)不同于 EECS,通过选举出非均匀分布的簇首,节点组成了 Voronoi 图^[15]结构的簇.(4)为簇首间进行多跳数据转发设计了一个能量高效的路由算法.

3 问题描述

在这一部分,首先给出本文采用的网络模型,然后阐述用非均匀分簇机制来解决“热区”问题的思想.

3.1 网络模型

考虑一个由 N 个随机部署的传感器节点形成的网络,其应用场景为周期性的数据收集. 用 s_i 表示第 i 个节点,相应的节点集合为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$, $|S| = N$. 我们假设:

(1)数据汇聚点位于一个方形观测区域 A 的外侧. 传感器节点和汇聚点 DS 在部署后均不再发生位置移动.

(2)所有节点都是同构的,具备数据融合的功能. 每个节点都有一个唯一的标识(ID).

(3)根据接收者的距离远近,节点可以自由调整其发射功率以节约能量消耗.

(4)链路是对称的. 若已知对方发射功率,节点可以根据接收信号的强度 $RSSI$ 计算出发送者到自己的近似距离^[16].

我们采用与文献[6]相同的无线通信能量消耗模型. 节点发射 l 比特的数据到距离为 d 的位置,消耗的能量由发射电路损耗和功率放大损耗两部分组成,即

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d^2, & d < d_o \\ lE_{elec} + l\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_o \end{cases} \quad (1)$$

其中 E_{elec} 表示发射电路损耗的能量. 若传输距离小于阈值 d_o ,功率放大损耗采用自由空间模型;当传输距离大于等于阈值 d_o 时,采用多路径衰减模型. ϵ_{fs} 、 ϵ_{mp} 分别为这两种模型中功率放大所需的能量. 节点接收 l 比特的数据消耗的能量为

$$E_{Rx}(l) = lE_{elec} \quad (2)$$

数据融合也消耗一定的能量,用 E_{DF} 表示融合单位比特数据消耗的能量. 我们假设邻近节点采集的数据具有较高的冗余度,簇首可以将其成员的数据融合成一个长度固定的数据包,然后发送给汇聚点.

3.2 能量消耗不均衡问题

传感器网络路由协议的一个重要目标,就是要合理高效地使用网络中各传感器节点的能量,延长网络的存活时间. 在以分簇方式组织的传感器网络中,路由分为簇内通信和簇首与汇聚点间通信(有时也称作簇首间通信)两部分. 当簇成员与簇首之间传输数据时,可以采用单跳通信的方式,这样易于调度各成员的数据传输. 当簇首向汇聚点进行长距离数据传输时,已有研究表明采用多跳路由的方式更为实际,且显著降低能量消耗. 本文将簇首节点组成一个多跳路由的骨干网. 靠近汇聚点的簇首在把自身数据传输给汇聚点的同时,还转发来自远离汇聚点的簇首的数据. 在每一轮中,簇首消耗的能量包括簇内部处理和簇之间处理两部分. 已有的分簇算法通常都是构造大小均匀的簇,以均衡簇首在簇内部进行数据处理时消耗的能量. 然而由于靠近汇聚点的簇首承担了额外的数据转发任务,因此其在簇首间通信的过程中将消耗更多的能量. 所以,若采用均匀分簇的方式,在每一轮中,靠近汇聚点的簇首将消耗更多的能量,造成节点过早能量耗尽而失效,降低了网络的存活时间.

在传统的同构网络分簇协议中,通过周期性地重新选择簇首(如 LEACH、HEED),可以平衡簇首与簇成员节点之间的能量消耗,但不能解决上述的“热区”问题. 以节点的剩余能量为依据选择簇首的方法(如 EECS)也不能完全解决这个问题,因为它只是在网络的局部比较节点剩余能量,无法从整体上协调节点的能量消耗以解决“热区”问题. 可以认为上述两种方法都是以被动的方式来均衡网络中节点的能量消耗,即在网络中出现能量消耗不均衡之后方采取措施来均衡能量消耗. 在结合这两种技术

的基础上,本文创新地设计了一种基于非均匀分簇的层次式路由协议.与前人的方法相比,本文提出的方法以主动的方式来均衡网络中所有节点的能量消耗,特别是均衡簇首的能量消耗.

4 基于非均匀分簇的路由机制

在网络部署阶段,汇聚点需要一个给定的发送功率向网络内广播一个信号.每个传感器节点在接收到此信号后,根据接收信号的强度计算它到汇聚点的近似距离.获得这个距离不仅有助于传感器节点向汇聚点传输数据时选择合适的发送功率以节约能量消耗,而且它还是算法构造大小非均匀的簇的必需信息之一.本节分两部分描述非均匀分簇算法 EEUC 和簇首间的多跳路由协议.图 1 给出本文提出的基于非均匀分簇的路由协议的示意,其中大小不等的圆表示簇首节点的大小非均匀的竞争范围,带箭头的粗线表示簇首间的多跳数据传输.

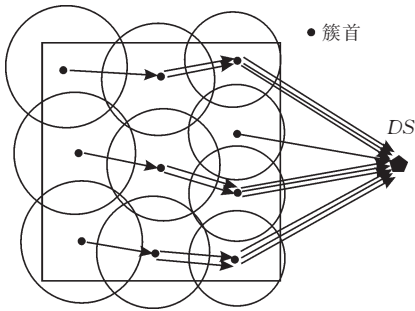


图 1 基于非均匀分簇的路由协议

4.1 EEUC 算法

EEUC 是一个分布式的竞争算法,以节点的剩余能量为主要比较依据.在采用分簇的传感器网络中,簇首是最重要的节点.它不仅需要管理所属簇成员,协调成员的数据传输,还要融合簇成员收集的数据,再将处理后的数据发送给汇聚点.由于簇首的负担较重,EEUC 算法在每个数据收集周期的开始重新构造簇,选择剩余能量较高的节点作为簇首.下面阐述竞争选取簇首的算法.算法 1 给出了任意节点 s_i 在簇首竞选过程中执行的算法伪码.

下面是对算法 1 的具体解释.首先,依概率在网络中选出部分节点成为候选簇首,参与竞选.普通节点成为候选簇首的概率为 T ,它是一个预先设置的阈值.未参与竞选的节点进入睡眠状态,直到簇首竞选过程结束.令 s_i 为任意的一个候选簇首. s_i 根据自身到汇聚点的距离信息计算它的竞争区域,区域的半径记作 R_c .下面定义候选簇首之间竞争的规则

规则 1. 在竞选过程中,若候选簇首 s_i 宣布其竞选获胜,则在 s_i 的竞争半径 R_c 内的所有候选簇首均不能成为最终簇首,需要退出竞选过程.

算法 1. EEUC 的簇首竞选算法.

- ① $\mu \leftarrow \text{RAND}(0, 1)$
- ② If $\mu < T$ then
- ③ $beTentativeHead \leftarrow \text{true}$
- ④ End if
- ⑤ If $beTentativeHead = \text{true}$ then
- ⑥ Broadcast $COMPETE_HEAD_MSG(ID, R_c, RE)$
- ⑦ Else
- ⑧ Exit
- ⑨ End if
- ⑩ On receiving a $COMPETE_HEAD_MSG$ form s_j
- ⑪ If $d(s_i, s_j) < s_j.R_c$ or $d(s_i, s_j) < s_i.R_c$ then
- ⑫ Add s_j to $s_i.S_{CH}$
- ⑬ End if
- ⑭ While $beTentativeHead = \text{true}$ do
- ⑮ If $\forall s_j \in s_i.S_{CH}, s_i.RE > s_j.RE$ then
- ⑯ Broadcast $FINAL_HEAD_MSG(ID)$ and then exit
- ⑰ End if
- ⑱ On receiving a $FINAL_HEAD_MSG$ form s_j
- ⑲ If $s_j \in s_i.S_{CH}$ then
- ⑳ Broadcast $QUIT_ELECTION_MSG(ID)$ and then exit
- ㉑ End if
- ㉒ On receiving a $QUIT_ELECTION_MSG$ form s_j
- ㉓ If $s_j \in s_i.S_{CH}$ then
- ㉔ Remove s_j from $s_i.S_{CH}$
- ㉕ End if
- ㉖ End while

图 2 给出了一张候选簇首的拓扑示意图,其中大小不同的圆代表候选簇首的竞争区域.按照规则 1 的要求, s_1 和 s_2 可以同时成为最终簇首,而 s_3 和 s_4 则不能同时成为最终簇首,因为 s_4 位于 s_3 的竞争区域内部.如前文所分析的,算法的目标是让靠近汇聚点的簇的成员较少,使其簇首能够预留部分能量供簇首间通信使用.因此,靠近汇聚点的候选簇首的竞争半径应该较小.亦即,随着候选簇首到汇聚点距离的减小,其竞争半径应该随之减小.记候选簇首的竞争半径的最大取值为 R_c^0 .算法需要控制竞争半径的取值范围,使得距离汇聚点最近的节点的竞争半径为 $(1-c)R_c^0$,其中 c 是用于控制取值范围的参数,在 $0 \sim 1$ 之间取值.候选簇首 s_i 确定其竞争半径 $s_i.R_c$ 的计算公式如下:

$$R_c = \left(1 - c \frac{d_{\max} - d(s_i, DS)}{d_{\max} - d_{\min}}\right) R_c^0 \quad (3)$$

其中 d_{\max} 和 d_{\min} 分别代表网络中的节点到汇聚点的距离的最大值和最小值, $d(s_i, DS)$ 代表节点 s_i 到汇聚点的距离. 竞争半径与节点到汇聚点的距离呈线性递减关系. 举个例子, 取 $c=1/3$ 时, 竞争半径的取值范围是 $2/3R_c^0 \sim R_c^0$.

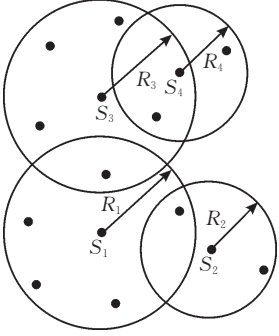


图2 候选簇首的竞争区域

每个候选簇首维护一个邻簇首集合 S_{CH} , 在这个集合内依据当前各节点的剩余能量高低竞争选出最终簇首. 候选簇首 s_i 的邻簇首集合包括与 s_i 具有规则 1 所约束的竞争关系的所有候选簇首节点, 其定义如下.

定义 1. 在 EEUC 簇首竞选算法中, 候选簇首 s_i 的邻簇首集合 $s_i.S_{CH}$ 为

$$s_i.S_{CH} = \{s_j | s_j \text{ 是候选簇首, 且 } d(s_i, s_j) < \max(s_i.R_c, s_j.R_c)\}.$$

在此算法中, 每个节点均以同样的功率发送广播消息, 为了节约能量, 这个广播半径设为 R_c^0 即可 (这保证了节点能够与邻簇首集合内的所有节点正常通信). 在算法 1 的第 5~6 行, 每个竞选节点广播竞选消息 COMPETE_HEAD_MSG, 消息的内容为节点的 ID、竞争半径 R_c 和当前剩余能量 RE. 在第 10~13 行, 节点根据收到的广播消息构建其邻簇首集合 S_{CH} . 当 S_{CH} 构建完成后, 在 14~26 行, 节点做出其是否能担任簇首的决策. 节点需要等待其邻簇首集合中所有能量比它大的节点先做出决策^①, 然后才能确定自身是否能担任簇首. 在 15~17 行, 一旦 s_i 发现它的剩余能量比其邻簇首集合中的节点的剩余能量都高, 则它将赢得竞选, 并广播获胜消息 FINAL_HEAD_MSG 以通知它的邻簇首. 在 18~21 行, 如果 s_i 收到来自 s_j 的获胜消息, 且 s_j 是 $s_i.S_{CH}$ 中的一个节点, 则 s_i 立即退出竞选, 并广播消息 QUIT_ELECTION_MSG 通知它的邻簇首. 在 22~25 行, 如果 s_i 收到来自 s_j 的退出消息, 且 s_j 是 $s_i.S_{CH}$

中的一个节点, 则 s_i 将 s_j 从其邻簇首集合中删除.

算法 1 过程结束后, 之前未参与竞选的节点从睡眠状态唤醒, 接着竞选产生的簇首向全网广播^② 其竞选获胜的消息 CH_ADV_MSG. 普通节点选择簇内通信代价最小亦即接收信号强度最大的簇首, 发送加入消息 JOIN_CLUSTER_MSG 通知该簇首. 这样, 网络中的节点组成了 Voronoi 图^[16] 结构的簇.

接下来进入簇内部的数据传输阶段. 簇首构建 TDMA 调度, 然后簇成员向簇首传输数据. 本文采用与 LEACH 相同的组织方式, 在此不再赘述.

4.2 簇首间多跳路由协议

在簇首将数据传输到汇聚点这个阶段, 簇首先对簇成员的数据进行融合处理, 然后将数据以多跳通信的方式发送至汇聚点. 由于传感器网络的这种独特的“多对一”的数据传输模式, 移动自组网络中成熟的路由协议在此无法适用, 传感器网络中已有的路由协议中也鲜有针对本文场景设计的算法.

在有些文献 (如 PEGASIS^[7]) 提出的传感器网络的多跳路由协议中, 中继节点对收到的数据进行数据融合, 然后再继续发送. 本文假设数据的冗余度有限, 来自不同簇的数据无法进一步融合, 中继簇首节点只是简单转发来自其它簇首的数据, 如图 1 所示.

引入一个阈值 TD_MAX. 若簇首到汇聚点的距离小于 TD_MAX, 则它直接与汇聚点进行通信; 否则应该尽量使用多跳路由的方式将数据传送给汇聚点. 在路由算法开始时, 每个簇首以相同的功率向全网广播一条消息 NODE_STATE_MSG, 包含其 ID、当前剩余能量和它到汇聚点的距离. 簇首 s_i 收到簇首 s_j 广播的消息后, 可以计算出它们之间的近似距离. 下文叙述当 $d(s_i, DS) \geq TD_MAX$ 时, 簇首 s_i 的路由选择策略.

Kawadia 等在文献^[17]指出, 选择邻近的节点作为下一跳节点有利于减少通信干扰. 本文将路由候选节点的选取范围限制在比其自身更邻近汇聚点的一个区域内.

定义 2. 在簇首间多跳路由构建过程中, 簇首 s_i 的路由候选节点集合 $s_i.R_{CH}$ 为

① 若节点的剩余能量相等, 则以节点的 ID 作为次比较依据.
② 在 LEACH 中, 簇首节点向全网范围广播此消息, 以使其它节点能够在全网范围内选择位置最佳的簇加入. 本文采用相同方法.

$$s_i.R_{CH} =$$

$$\{s_j | d(s_j, DS) < d(s_i, DS) \text{ 且 } d(s_i, s_j) \leq k s_i.R_c\},$$

其中 k 是使得 $s_i.R_{CH}$ 非空的最小整数(若不存在使 $s_i.R_{CH}$ 非空的整数,则定义 $s_i.R_{CH}$ 为空集,且 s_i 将其数据以单跳方式直接传输至汇聚点)。

s_i 从其路由候选节点集合 R_{CH} 中选择一个作为数据转发节点. 选择剩余能量较多的节点作为数据中继节点有利于均衡能量消耗,避免有些节点因为能量消耗过多而较早死亡. 文献[14]中提出的 GBR 协议亦包含一种以剩余能量为依据来调整节点梯度的数据分发策略. 但是单纯地考虑剩余能量可能导致网络的整体能量利用效率下降. 假设 s_i 选择 s_j 作为其数据转发节点. 为简化问题分析,假设通信采用自由空间模型,并假设 s_j 将数据直接传输至汇聚点. 则为了传输 l 比特的数据至汇聚点, s_i 和 s_j 消耗的能量为 $E_{2-hop} = E_{Tx}(l, d(s_i, s_j)) + E_{Rx}(l) + E_{Tx}(l, d(s_j, DS))$

$$= l(E_{elec} + \epsilon_{fs} d^2(s_i, s_j)) + lE_{elec} +$$

$$l(E_{elec} + \epsilon_{fs} d^2(s_j, DS))$$

$$= 3lE_{elec} + l\epsilon_{fs}(d^2(s_i, s_j) + d^2(s_j, DS)).$$

由上式可知, $d^2(s_i, s_j) + d^2(s_j, DS)$ 决定了网络能量消耗的高低.

定义 3. 若簇首 s_i 选取 s_j 为其中继节点,带来的网络能量开销指标为

$$E_{relay} = d^2(s_i, s_j) + d^2(s_j, DS) \quad (4)$$

直观上看,若 s_j 位于 s_i 与汇聚点之间,则有利于节约能量,而这时链路的 E_{relay} 也较小. 为了综合考虑节点的剩余能量和链路的能量开销指标 E_{relay} 这两个参数,本文的路由策略为: s_i 从 R_{CH} 中 E_{relay} 最小的两个节点^①中,选择剩余能量最高的节点作为其路由的下一跳节点.

在路由方式确定之后,簇首节点组成了一棵以汇聚点为根节点的树,数据沿着汇聚点的方向在边上传输.

5 EEUC 的分析

这一节给出非均匀分簇算法 EEUC 的一些分析和说明. 该算法是消息驱动的,因此首先来分析它的消息复杂度.

性质 1. 在整个网络中,EEUC 算法的消息复杂度为 $O(N)$.

证明. 在算法开始,有 $N \times T$ 个节点成为候选簇首而参与竞选,共广播 $N \times T$ 条 COMPETE_HEAD_MSG 消息. 然后,每个候选簇首或者广播一

条消息 FINAL_HEAD_MSG 以宣布其竞选成功,或者广播一条消息 QUIT_ELECTION_MSG 以宣布其退出竞选. 假设共选出 k 个簇首,则它们广播 k 条 CH_ADV_MSG 消息,而 $N - k$ 个簇成员广播 $N - k$ 条 JOIN_CLUSTER_MSG 消息. 因此,网络中总的消息开销为

$$N \times T + N \times T + k + N - k = (2T + 1)N$$

所以消息复杂度为 $O(N)$.

证毕.

性质 1 说明 EEUC 算法的消息开销较小,能量高效. HEED 的分簇算法也是消息驱动的,其消息交换次数的上界为 $N_{iter} \times N$, N_{iter} 是消息迭代的次数. 因为 EEUC 避免了消息迭代,因此消息开销低于 HEED.

由性质 1 的证明可知,阈值 T 决定算法的消息开销. 选择合适的 T 既可以让大量剩余能量较高的节点参与竞选过程,又不至于导致消息开销过大. 关于 T 的优化取值,我们在先前工作^[12]中通过实验给出了详细的分析.

接下来分析 EEUC 算法中的参数 R_c^0 和 c 的取值对网络存活时间的影响. 簇的成员数目之间的非均匀程度由 c 决定. c 的值越大,候选簇首的竞争半径的差异越大,因此簇的成员数目间的差异越明显. 而当 c 等于 0 时,候选簇首的竞争半径相同,算法将生成大小均匀的簇. 算法中所生成簇的数目由 R_c^0 和 c 共同决定. 固定 c ,当 R_c^0 增大时,每个候选簇首的竞争半径随之增大,因此所生成的簇的数目随之减小;固定 R_c^0 ,当 c 增大时,每个候选簇首的竞争半径随之减小,因此所生成的簇的数目随之增加. R_c^0 和 c 的优化取值可以优化网络中节点的能量消耗,延长网络的存活时间. 本文致力于设计非均匀分簇的算法,用理论化的方法选择最优的参数还在进一步的研究之中.

在算法 1 中,候选节点需要等待其邻簇首集合中所有能量比它大的节点先做出决策,然后才能确定自身能否担任簇首. 这要求算法确定一个全局一致的等待时间,超过此时间后算法终止. 以图 3 所示的网络拓扑为例,分析影响等待时间的因素. 在图 3 中,假设 5 个节点 $s_1 \sim s_5$ 的剩余能量依次递增. 因此下列事件依次先后发生: s_5 宣布其成为簇首, s_4 退出竞选, s_3 宣布其成为簇首, s_2 退出竞选, s_1 宣布其成为簇首. 算法从开始到结束共持续了 4 条消息的传递时间. 这个例子说明算法需要等待的时间由网络中

① 若 $s_i.R_{CH}$ 仅含一个节点,则无条件选择其作为下一跳节点.

候选节点构成的单调能量链的最大长度决定。因为节点的剩余能量分布呈现随机性，所以这条链越长，其出现的概率越低。在文献[18]中，Basagni 研究了移动自组网中一个分簇算法中类似的问题，并指出等待时间与网络中的节点个数无关，而与网络的能量拓扑有关。在本算法的实现中，我们将等待时间设为传递 5 次消息所需的时间，并且发现所有候选节点在这段时间内都能正常做出竞选决策。这说明 EEUC 分簇算法的时间开销也较小。

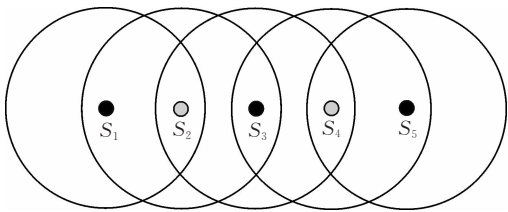


图 3 由 5 个节点构成的链状拓扑

6 实验结果及分析

我们用 C 语言编写模拟程序对基于非均匀分簇算法 EEUC 的路由协议进行性能分析与评估。首先研究 EEUC 分簇算法所选择的簇首的特征，然后分析协议的能量效率。为简单起见，假设采用理想的 MAC 协议，忽略无线链路中可能发生的丢包错误。实验中统计传感器节点接收数据、融合数据和发送数据所消耗的能量，计算网络的存活时间(用轮数表示)，来分析协议的能量效率。为了证明本文提出的路由协议的能量高效，我们将 EEUC 与 LEACH、LEACH-E、HEED 和 HEED-M^① 4 种基于分簇的路由协议进行比较。为便于下文的分析，表 1 对这 5 种协议的特征进行了概括。在 LEACH-E 中，每个节点需要估计当前网络中所有节点的剩余能量之和；本文的实现方法是在每一轮的结束，簇成员将自己的剩余能量汇报给簇首，簇首将所有簇成员(包括自身)剩余能量之和汇报给汇聚点，然后汇聚点计算整个网络的能量和，并广播至所有节点。

表 1 5 种协议的特征概括

协议	簇首选取算法	簇首间通信方式
LEACH	完全随机	单跳
LEACH-E	考虑节点能量，随机	单跳
HEED	考虑节点能量及簇内通信代价，局部竞争	单跳
HEED-M	考虑节点能量及簇内通信代价，局部竞争	多跳
EEUC	考虑节点能量，簇首分布非均匀，局部竞争	多跳

实验中所用的参数如表 2 所示，其中能量消耗模型相关的参数取自文献[6]。除非特别指出，本协议的参数设置为 $T = 0.4$ ， $R_c^0 = 90\text{m}$ ， $c = 0.5$ ， $TD_MAX = 140\text{m}$ 。其它协议中的参数通过运行多次实验来找出其最优取值。

表 2 实验参数

参数	取值
网络覆盖区域	$(0,0) \sim (200,200)\text{m}$
数据汇聚点位置	$(100,250)\text{m}$
N	400
传感器节点初始能量	0.5 J
E_{elec}	50 nJ/bit
ϵ_{fs}	10 pJ/(bit · m ²)
ϵ_{mp}	0.0013 pJ/(bit · m ⁴)
d_0	87 m
E_{DF}	5 nJ/(bit · signal)
数据包大小	4000 bits

6.1 簇首的特征

由前一节的分析可知，EEUC 分簇算法选取的簇首的数目由参数 R_c^0 和 c 共同决定。图 4 显示了 c 取两个不同的值时，簇首的数目与 R_c^0 之间的关系。它验证了前一节的分析，即竞争半径越小，算法生成的簇首的数目越大。在图中， $c = 0.5$ 时对应的曲线高于 $c = 0$ 时对应的曲线。这是因为当 R_c^0 固定时， c 的增大导致候选簇首的竞争半径变小，因此簇首的数目增大。

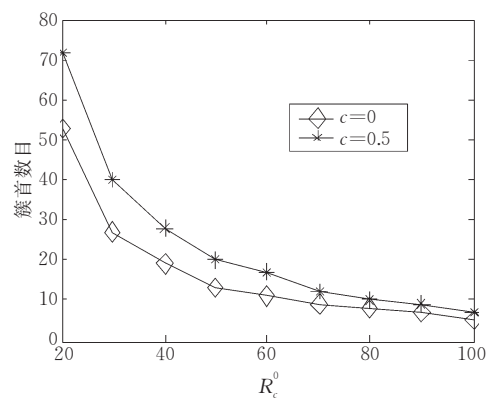


图 4 EEUC 生成的簇首的数目

接着说明 EEUC 分簇算法的稳定性。在网络拓扑固定的情况下，一个稳定的分簇协议应该生成数目比较一致的簇首，来优化网络的能量消耗。文献[6]推导了单跳网络中最优簇首数目的近似计算公式，从每种分簇协议的模拟过程中随机选出 100 轮，统计所生成的簇首个数的分布情况，结果见图 5。由

① 在簇首与汇聚点之间数据传输的阶段，文献[10]中 HEED 使用单跳通信的方式，而在文献[19]中使用了多跳通信的方式，称后者为 HEED-M。这是二者的唯一区别。

图可见,每种协议生成的簇首的数目都有一个期望值,它是协议在此场景下最优的簇首数目. LEACH 和 LEACH-E 的簇首数目的波动范围比较大,这是因为 LEACH 和 LEACH-E 单纯性地采用随机数与阈值的机制产生簇首,因此簇首的数目变化比较明显. HEED 和 EEUC 的簇首数目非常集中于期望值,这是因为 HEED 和 EEUC 均采用了候选簇首

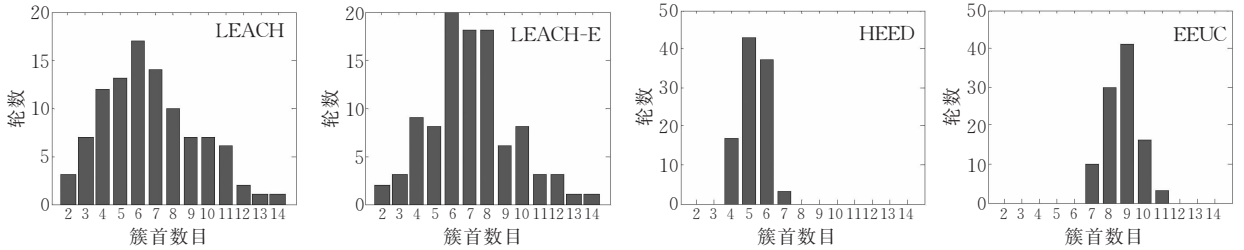


图 5 各种协议生成的簇首数目分布统计

6.2 能量效率

由于簇首消耗的能量占网络中能量消耗的最主要部分,因此首先比较 5 种协议所生成的簇首在一轮中所消耗的能量之和. 从实验中随机选取 10 轮,统计各轮中所有簇首消耗的能量,结果见图 6. 观察图 6,发现 EEUC 和 HEED-M 的簇首消耗的能量最低,且二者接近相等. 这是因为在这两种协议中,簇首采用多跳通信的方式将数据发送至汇聚点,显著降低了能量消耗. LEACH 和 LEACH-E 的簇首消耗的能量最高,不仅因为它们采用单跳通信的方式将数据发送至汇聚点,而且如图 5 所示,它们构造的簇首的数量略多于 HEED,与汇聚点通信的次数增大,导致能量消耗增大. 另一方面,LEACH 和 LEACH-E 都没有控制簇首在网络中的分布,而且簇首的数量不够稳定,因此簇首消耗的能量之和有较明显的波动. EEUC 和 HEED-M 均克服了 LEACH 和 LEACH-E 的这些不足之处,降低了能量消耗.

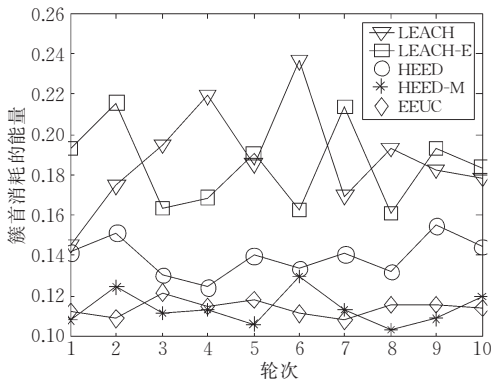


图 6 簇首消耗的能量之和

在局部区域进行竞争的方法,有效地控制了算法所生成的簇首的数目. 值得注意的是,EEUC 生成的簇首数目多于 HEED 生成的簇首数目,这是因为 EEUC 构造大小非均匀的簇,在靠近汇聚点的区域产生更多的簇首. 总的来说,EEUC 通过简单的竞争算法生成了数目稳定的簇,可靠性好.

其次研究 5 种协议对簇首消耗的能量均衡情况. 因为簇首的负担较重,只有较好的均衡簇首的能量消耗,才能避免某些簇首过早死亡,提高能量效率,延长网络存活时间. 图 7 显示了在随机选取的 10 轮中,各轮中簇首消耗的能量方差. 从图中明显地看出,EEUC 的方差最低而且最稳定,因此最好地均衡了簇首的能量消耗. LEACH、LEACH-E 和 HEED-M 的方差比较接近,HEED 的方差最高,而且它们都有明显的波动. 这说明它们都没有采取有效的策略均衡簇首的能量消耗. 在 HEED 中,某些簇可能只含有一个节点即簇首自身,因此导致簇首的负载不均衡,能量消耗的差异比较大.

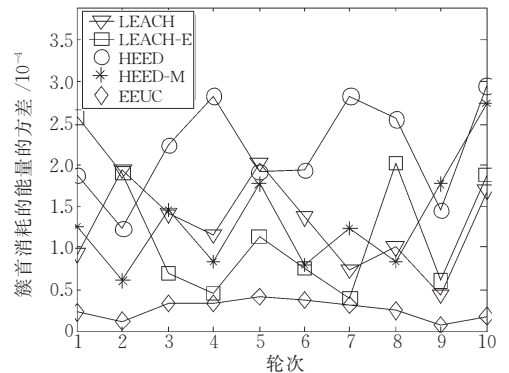


图 7 簇首消耗的能量方差

本文的核心思想是利用非均匀分簇的思想来解决“热区”问题,延长网络的存活时间. 现在来验证这种方法的有效性. 在前一节已经指出,簇大小的非均匀程度由 c 决定. 我们在实验中从 0 到 1 变化 c 的取值,观察网络中第一个节点死亡的时间随之变化的情况,结果见图 8. 当 c 等于 0 时,算法生成大小均

匀的簇. 当 c 从 0 增大到 0.5 的过程中, 非均匀分簇的算法逐渐平衡节点的能量消耗, 因此网络的存活时间持续增长. 而当 c 大于 0.5 后, 网络的存活时间逐渐下降, 这是因为算法产生的簇首的数目逐渐增加, 增大了网络的能量消耗. 因此, 当其它参数确定后, 存在一个最优的 c 的取值. 在图 8 中, 当 c 等于 0.5 左右时, 网络的存活时间最长.

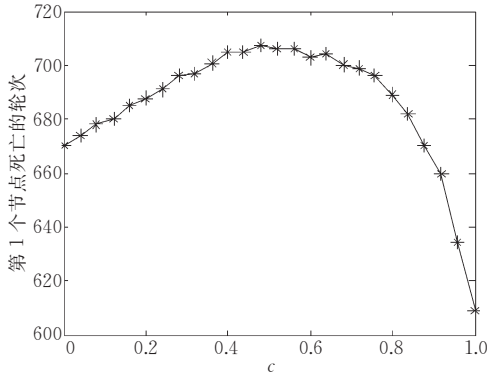


图 8 网络存活时间随 c 变化的趋势

最后来比较各种分簇协议对网络存活时间的影响. 图 9 显示了网络中存活的节点数目随时间变化的情况. 显然, 无论是第一个节点死亡的时间还是最后一个节点死亡的时间, EEUC 均优于其它 4 种协议. 从第一个节点死亡到最后一个节点死亡的时间跨度可以反映出网络中节点的能量均衡情况, 跨度越短说明网络的能量使用越高效. EEUC 不仅显著地延长了网络的存活时间, 而且时间跨度也远小于其它协议, 这说明 EEUC 很好地均衡了网络中所有节点的能量消耗. LEACH-E 在选取簇首时虽然考虑了节点的剩余能量, 但由于传播能量消息带来的开销, 其性能还略差于 LEACH. HEED 的第一个节点死亡时间明显早于 LEACH, 但最后一个节点死亡的时间晚于 LEACH, 这表明 HEED 并没有较好地均衡节点的能量消耗, 造成有些节点过早死亡, 这在图 7 中也有对应的说明. HEED-M 由于采用了多

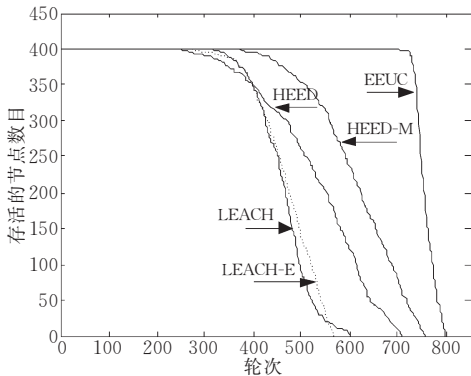


图 9 各种分簇协议的网络存活时间

跳通信, 性能与 HEED 相比有了提高, 但和 EEUC 仍有较大差距, 这是因为它没有考虑簇首的能量消耗均衡, 造成部分节点过早失效.

总结实验结果, 本文提出的基于非均匀分簇的路由协议具有以下优点: (1) 分簇算法稳定, 所生成簇的数目波动小; (2) 能量消耗低, 且有效平衡了簇首的能量消耗; (3) 显著延长了网络的存活时间. 总之, 用网络的存活时间这一重要指标来衡量, 其性能明显优于其它四种分簇协议.

7 结论和进一步的工作

本文提出了一种新颖的基于分簇的传感器网络路由协议, 其核心思想是利用一个能量高效的非均匀分簇算法 EEUC 将网络组织成大小非均匀的簇, 以解决多跳路由的传感器网络中常见的“热区”问题. 实验表明, 本路由协议优化了网络中的能量消耗, 较好地解决了“热区”问题; 和已有的几个分簇协议相比, 显著地延长了网络的存活时间.

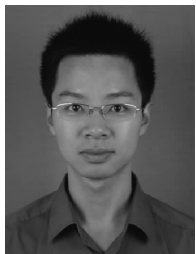
用接收信号强度测定节点间距离的方法, 虽然符合低功率、低成本的要求, 但因为电磁波的不稳定, 可能产生一定的测距误差. 本文致力于设计能量高效的路由协议, 未能对算法中的参数优化取值进行详细分析. 下一步工作将改进测距方法, 并研究算法参数的最优取值.

致 谢 作者特别感谢审稿人提出的宝贵意见!

参 考 文 献

- [1] Estrin D. Wireless sensor networks tutorial part IV: Sensor network protocols//Proceedings of the ACM Mobile Computing and Networking (MobiCom), Atlanta, GA, 2002
- [2] Krishnamachari B, Estrin D, Wicker S. The impact of data aggregation in wireless sensor networks//Proceedings of the IEEE International Workshop on Distributed Event-Based Systems (DEBS), Vienna, Austria, 2002: 575-578
- [3] Mhatre V, Rosenberg C. Design guidelines for wireless sensor networks: Communication, clustering and aggregation. *Ad Hoc Networks*, 2004, 2(1): 45-63
- [4] Li C F, Ye M, Chen G H, Wu J. An energy-efficient unequal clustering mechanism for wireless sensor networks//Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS 2005), Washington, DC, 2005
- [5] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor

- networks//Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, HI, 2000: 1-10
- [6] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670
- [7] Lindsey S, Raghavendra C, Sivalingam K M. Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2002, 13(9): 924-935
- [8] Dasgupta K, Kalpakis K, Namjoshi P. An efficient clustering-based heuristic for data gathering and aggregation in sensor networks//Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), New Orleans, LA, 2003: 1948-1953
- [9] Choi W, Shah P, Das S K. A framework for energy-saving data gathering using two-phase clustering in wireless sensor networks//Proceedings of the International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services (MOBIQUITOUS), Boston, MA, 2004: 203-212
- [10] 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): 660-669
- [11] Soro S, Heinzelman W. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering//Proceedings of the 5th International Workshop on Algorithms for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks, Denver, CO, 2005
- [12] Ye Mao, Li Cheng-Fa, Chen Gui-Hai, Wu Jie. An energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks* (to be published)
- [13] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks//Proceedings of the ACM Mobile Computing and Networking (MobiCom), Boston, MA, 2000: 56-67
- [14] Schurgers C, Srivastava M B. Energy efficient routing in wireless sensor networks//Proceedings of the IEEE Military Communications Conference (MILCOM), McLean, VA, 2001: 357-361
- [15] Preparata F P, Shamos M I. *Computational Geometry: An Introduction*. New York: Springer-Verlag, 1985
- [16] Gibson J. *The Mobile Communications Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 1999
- [17] Kawadia V, Kumar P R. Power control and clustering in Ad Hoc networks//Proceedings of the IEEE INFOCOM, San Francisco, CA, 2003: 459-469
- [18] Basagni S. Distributed clustering for ad hoc networks//Proceedings of the 4th International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms, and Networks (ISPAN), Fremantle, Australia, 1999: 310-315
- [19] Younis O, Fahmy S. An experimental study of routing and data aggregation in sensor networks//Proceedings of the International Workshop on Localized Communication and Topology Protocols for Ad hoc Networks (LOCAN), Washington, DC, 2005



LI Cheng-Fa, born in 1981, M. S. candidate. His research interests focus on wireless sensor networks.

CHEN Gui-Hai, born in 1963, professor, Ph. D. supervisor. His research interests include interconnection net-

works, high performance computer architecture, graph theory, P2P computing and network systems.

YE Mao, born in 1981, M. S. candidate. His research interests include P2P computing and wireless sensor networks.

WU Jie, born in 1960, Ph. D., professor. His research interests include wireless networks and mobile computing, parallel and distributed systems.

Background

This work is supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) under grant No. 2006CB303004, the National Natural Science Foundation of China under grant No. 60573131, and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province under grant No. BK2005208. Those projects are studied around theories and principles in nowadays network environments, i. e., Internetwork and P2P systems.

The group has focused on research of wireless sensor networks for over three years. They studied clustering algo-

gorithms and cluster-based routing mechanisms, coverage and topology management methods, security enhancement mechanisms. They have published several papers in famous international conferences and journals.

This paper is aiming to study the impacts of intra- and inter-cluster traffic simultaneously in the design of routing and clustering strategies. A novel uneven cluster-based routing protocol for mitigating the hot spot problem is proposed.