

基于区域分簇的大规模无线传感器网络生命周期优化策略

王妍^{1,2}, 章婷婷¹, 宋知润³, 王俊陆^{1*}, 郭敬玉¹

(1. 辽宁大学 信息学院, 沈阳 110036; 2. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819;

3. 国网辽宁省电力有限公司 沈阳供电公司, 沈阳 110000)

(* 通信作者电子邮箱 717466572@qq.com)

摘要:针对环境监测、电网冰灾监测等大规模监测系统中监测区域覆盖广、传感器数量大等特性,为节约网络能耗以延长生命周期,提出了一种基于区域分簇的大规模无线传感器网络生命周期优化策略(RCS)。该策略首先利用传感器节点的位置信息进行凝聚的层次聚类(AGNES)算法将大规模网络分区以优化簇首的分布;其次,候选簇首节点竞选簇首成功后进行不均匀分簇,同时加入时间阈值来均衡簇首节点的能耗;最后,采用簇间多跳路由,根据节点剩余能量、与汇聚点距离计算网络能耗代价来构建最小生成树进行路由选择。在仿真实验中,该策略与经典的低功耗自适应分簇(LEACH)协议和能量高效的非均匀分簇(EEUC)算法比较,簇首能耗平均分别减少了45.1%和2.4%,网络生命周期分别延长了38%和3.7%。实验结果表明,RCS在大规模网络中能均衡整体网络能耗,显著延长了网络的生命周期。

关键词:无线传感器网络;分区;不均匀分簇;最小生成树;生命周期

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Regional cluster-based lifetime optimization strategy for large-scale wireless sensor networks

WANG Yan^{1,2}, ZHANG Tingting¹, SONG Zhirun³, WANG Junlu^{1*}, GUO Jingyu¹

(1. School of Information, Liaoning University, Shenyang Liaoning 110036, China;

2. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China;

3. State Grid Shenyang Electric Power Supply Company, Shenyang Liaoning 110000, China)

Abstract: In view of the characteristics of wide monitoring area and large number of sensors in large-scale monitoring systems like environment monitoring and power grid ice-disaster monitoring system, a Regional Cluster-based lifetime optimization Strategy for large-scale wireless sensor network (RCS) was proposed to save the network energy consumption and prolong the lifetime of the network. The strategy firstly used AGNES (Agglomerative Nesting) algorithm to divide the network into several subareas based on node location for optimizing the distribution of cluster heads. Secondly, uneven clusters would be conducted after cluster heads were generated, and a time threshold value was set to balance node energy consumption. Finally, for inter-cluster communication, a multi-hop routing was adopted by constructing minimum spanning tree on the basis of calculating network energy cost to balance the energy consumption of the cluster heads. In the simulation, compared with LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) and EEUC (Energy-Efficient Uneven Clustering) algorithm, RCS respectively reduced the cluster head nodes' energy consumption by 45.1% and 2.4% on average; and respectively extend the network lifetime by 38% and 3.7%. The simulation results show that RCS can be more efficient to balance the overall network energy consumption, and significantly prolong the network lifetime.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); partitioning; unequal clustering; minimum spanning tree; network lifetime

0 引言

近年来,物联网因其巨大的应用前景已成为各国政府、学术界和工业界极度重视的研究热点。无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由部署在监测区域内大量传感器节点相互通信形成的多跳自组织网络,是物联网底层

网络的重要技术形式。目前大规模无线感知网络在军事、智能交通、环境监测、地震冰灾和现代农业等领域的应用需求非常迫切^[1],而如何有效解决能耗问题^[2],提高网络生命周期一直是其核心研究问题^[3]。

现有的物联网中无线感知网络的规模一般都较小,节点数目大多在几十到几百个。而在大规模的监测系统应用背景

收稿日期:2015-06-17;修回日期:2015-07-17。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61472169,61300233,61472072);国家科技支撑计划项目(2012BAF13B08);国家973预研项目(2014CB360509);辽宁省科学事业公益研究基金资助项目(2015003003);辽宁省科技攻关项目(2012216007)。

作者简介:王妍(1978-),女,辽宁抚顺人,副教授,博士研究生,CCF会员,主要研究方向:传感器网络、感知数据处理、智能电网处理;章婷婷(1991-),女,江苏盐城人,硕士研究生,主要研究方向:传感器网络;宋知润(1989-),女,辽宁铁岭人,助理工程师,主要研究方向:智能电网;王俊陆(1988-),男,辽宁丹东人,助理实验师,硕士研究生,CCF会员,主要研究方向:感知数据处理;郭敬玉(1989-),女,辽宁沈阳人,硕士研究生,主要研究方向:感知数据处理。

下,为获取精准的监测数据,通常需在监测范围内布置大量的传感器节点来采集数据,呈现出分布范围广、规模大、数量多且密度不均匀等特征。另外,若大量传感器节点将感知到的数据经过多跳传输到汇聚中心会加快汇聚点周围节点的能量消耗,即产生能量空洞问题^[4],从而缩短了网络生命周期。

针对大规模传感器网络中节点数量多且分布不均匀的情况,提出一种基于区域分簇的大规模无线传感器网络生命周期优化策略(Regional Cluster-based lifetime optimization Strategy, RCS),该策略将大规模网络划分成区以均衡簇首分布,各区彼此独立,区内并行采用不均匀分簇以缓解能量空洞问题;簇间通信时构建基于网络能量代价的最小生成树,合理有效地进行多跳路由。实验结果表明,该算法能有效提高网络运行效率,均衡网络能量消耗,延长网络生存周期。

1 相关工作

在无线传感器网络体系结构中,基于分簇的层次式路由具有拓扑管理方便、能量利用高效、数据融合简单等优点^[5]。经典的低功耗自适应集簇分层协议(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH)^[6]随机选举簇首,并以单跳方式让簇首与汇聚点直接通信。基于簇首距汇聚点距离较远,又传感器节点通常由电池供电而受能量约束,研究表明,簇首与汇聚点通信时采用多跳路由更有利于节约能量^[7]。Younis等^[8]提出的混合式分簇(Hybrid Energy-Efficient Distributed clustering, HEED)协议先根据节点的剩余能量选取簇首,然后以簇内部通信代价的高低竞争选出最终簇首,由于需要在簇半径内进行多次消息迭代,其通信开销也比较显著。文献[9]首次提出利用非均匀分簇解决能量空洞,但其考虑的是一个异构网络,簇首为超级节点,且事先计算好节点部署位置,无动态构造簇的操作。文献[10]提出的聚类方案(Energy-Efficient Clustering Scheme, EECS)中,通过考虑候选簇首到汇聚点的距离远近构造不均匀的簇来均衡簇首负载,但其只是在局部比较节点剩余能量,没有从整体协调节点能耗,并且簇间通信同样采用单跳通信,限制了算法的扩展性,不适合在大规模网络中使用。

Li等在文献[11]中提出了一种将非均匀分簇与簇间多跳路由有机结合的路由协议(Energy-Efficient Uneven Clustering, EEUC),利用非均匀竞争半径使得靠近基站的簇的成员数目相对较小,从而簇首能节约能量以供簇间数据转发使用,均衡网络中所有节点的能量消耗。文献[12]中继承非均匀分簇结构,并在此基础上结合蚁群算法进行路由优化,引入链路可靠性和实时性参数进行多路径搜索,更新信息素并设计下一跳概率公式,但是这样的策略易陷入局部最优。文献[13]则针对网络中耗能不均问题提出一种基于马尔可夫博弈的能量均衡路由算法,定义了能量和信誉值的二元收益函数,给出节点转发的状态转移概率,并根据收益函数进行能量调节,求解出能量和收益之间的均衡系数,促进节点间的合作,实现节点能量的均衡消耗。另外,随着传感器网络应用的拓展,网络服务质量(Quality of Service, QoS)路由算法也成为研究的热点之一^[14]。

上述优化无线传感器网络生命周期的方法主要可以归纳为:1)现有的算法在感知节点庞大的情况下,因网络内每个节点需参与簇首竞争进行比较,整个网络消息量会因此骤增,

效率不高。2)节点竞选簇首时考虑其剩余能量虽有利于均衡网络能耗,但在节点分布密集程度不同时可能当选的簇首不理想,不能均衡节点能耗。

因此,本文提出的基于区域分簇的大规模无线传感器网络生命周期优化策略 RCS 是在传感器节点数量庞大、分布不均的情况下先划分网络进行局部并行分簇,不仅减少通信量,提高运行效率,也能均衡簇首分布。采用不均匀分簇,并设置时间阈值控制簇首竞争的比例,提高竞争效率。在簇间通信时综合考虑簇首节点之间的通信能耗、剩余能量和与 Sink 的距离来构建基于网络能量代价的最小生成树进行多跳路由,均衡簇首能耗,从而有效延长网络生命周期。

2 大规模传感器网络的区域划分策略

2.1 网络模型及假设

考虑在一个矩形监测区域内随机部署 n 个传感器,周期性监测周围环境进行数据采集,汇聚点 Sink 位于区域中心。假设此时网络能覆盖全部监测区域。 s_i 表示第 i 个传感器节点,则节点集合为 $S = \{s_i | 1 \leq i \leq n\}$ 。有以下假设:

- 1) 所有节点都是同构的,且都有唯一的 ID;
- 2) 节点部署后均不会发生位置移动,可通过某种定位算法获知自身的地理位置;
- 3) 链路对称,若已知对方发射功率,可根据接收信号强度指示(Received Signal Strength Indication, RSSI)计算其到发送者的近似距离;
- 4) 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。

2.2 能耗模型

无线传感器网络中节点的能耗来源主要有数据的采集、融合与传输,其中数据传输所消耗的能量远远大于其他部分的能耗^[16]。因此,本文主要考虑网络中数据传输能耗,采用典型的无线通信能量耗费模型,见式(1)。节点发送 l 比特的数据到距离为 d 的位置,其能耗为:

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\varepsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ lE_{elec} + l\varepsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

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_0 ,功率放大损耗采用自由空间模型;若传输距离大于等于阈值 d_0 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。同样,节点接收 l 比特的数据消耗的能量为:

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

此外,用 E_{DA} 表示融合单位比特数据消耗的能量,即簇首节点进行簇内数据融合的时候,每处理 1 b 的数据需要的能量损耗为 E_{DA} 。

2.3 网络分区

在已有算法的初始阶段,网络中所有节点都要在全局内进行判断是否成为簇首节点,并在簇首选定后以自组织的方式形成簇,这就需要一系列的广播和设置工作。在节点数目庞大且分布不均匀的情况下,由于所有节点都要参与比较,从总体上看,整个系统发送的广播数量非常多。图1给出本文网络分区拓扑示意图,感知节点随机分布在监测区域内,有密

集程度区分, Sink 节点位于区域中心。

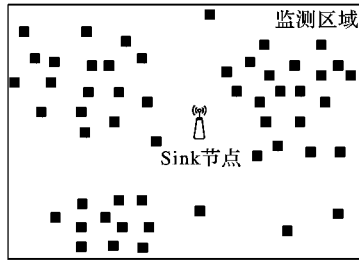


图1 网络分区拓扑图

本文采用层次聚类算法先将大规模网络划分为若干子区,各区独立选举簇首和分簇以提高并行效率,减少所有节点的能耗。在网络分区阶段,节点首先将自己的位置信息发送给汇聚点,由汇聚点根据节点间的距离将整个网络划分为多个子区域,规定每个节点只隶属于一个区。划分结束后,由汇聚点向节点广播子区划分的相关信息,最后由各个节点根据这些信息及其位置确定所属的子区。划分好的子区在整个网络生命周期内固定不变,以减少频繁分簇的能量消耗。

由式(1)可知,节点之间数据传输的能耗与距离密切相关,所以分区时采用凝聚的层次聚类方法——AGNES (Agglomerative Nesting)^[17],基于节点间距离对各节点进行聚类划分网络,划分后的各子区内节点分布相对均匀。需要注意的是,这里只考虑距离因素,而对其他可能对网络生命周期也有影响的因素如剩余能量不作考虑,因为节点的剩余能量是实时变化的,这样会导致分区也要动态变化。为防止过度拟合,减少离群点对聚类结果的影响,需设定阈值 M ($M \in (0,1)$),即当被聚类的节点数占总数的比值为 M 时,聚类停止。这样,将分布相对均匀的节点划分到一个区域里,各区节点只需进行局部通信来竞选簇首,既改善簇首分布不均匀问题,又减少了通信代价。

如图2所示,经过聚类后,图1的整个网络会被划分成3个密集程度不同的子区。在数据传输过程中,子区内的感知节点将数据传给竞选出的簇首再传给汇聚点 Sink;而对于子区之外的感知节点,称为离群点,在数据传输过程中,选择距其最近的簇并将数据传输给区内与其最近的节点或是直接传给汇聚点 Sink。

3 分布式的区域内分簇策略

从图2中可以看出,监测区域内感知数据需以多跳的方式传送到汇聚点,易导致在汇聚点周围形成能量空洞,进而无法将感知数据传送到汇聚点,严重影响网络寿命^[2]。实验结果^[18]表明,一个传感器网络生命结束后,总的节点剩余能量超过 90%。本文经过上述网络分区后将网络划分为若干子区,各区彼此独立,而区内依据局部竞争,采用分布式的均匀分簇策略以缓解能量空洞问题,有助于提高竞选效率,延长网络生命周期。

3.1 分簇策略

本文分布式的区域内分簇策略按周期性进行数据采集,每轮包括设置和稳定两个阶段,在设置阶段完成簇首竞选和组簇的工作,数据的收集和融合处理、簇间通信则在稳定阶段进行。在设置阶段开始时,汇聚点 Sink 广播一条用于网络初始化的消息,节点根据接收到的消息强度计算与 Sink 的距

离。

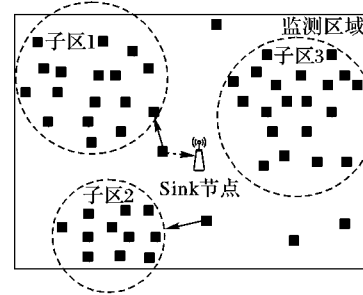


图2 网络分区图

3.1.1 竞选簇首

同 EEUC^[10]中,参与竞选的候选节点都维护一个邻居节点表,见表1,并按一定规则竞争出最终簇首。

表1 邻居节点信息

id	state	E_{res}	d_{tosk}
----	-------	-----------	------------

表1中,id 字段为节点的唯一标识;state 字段表示节点状态,为“Candidate”; E_{res} 是邻居节点的剩余能量; d_{tosk} 是邻居节点到汇聚点 Sink 的距离长度。

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。

而候选簇首 s_i 的邻居节点集合包括与 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 RCS 簇首竞选算法中,候选簇首 s_i 的邻居节点集合 $s_i.Neb$ 为:

$$s_i.Neb = \{s_j | s_j \text{ 是候选簇首}, d(s_i, s_j) < \max(s_i.R_{comp}, s_j.R_{comp})\}$$

每个候选簇首的竞争范围为 $R_{comp}^{[9]}$, 见式(3):

$$s_i.R_{comp} = \left[1 - c \frac{d_{max} - d(s_i, sk)}{d_{max} - d_{min}} \right] R_{comp}^0 \quad (3)$$

其中: d_{max} 和 d_{min} 分别代表节点与汇聚点 Sink 的最大、最小距离; $d(s_i, sk)$ 代表 s_i 到 Sink 的距离; R_{comp}^0 为候选簇首竞争半径的最大值; c 是位于 0 ~ 1 的常数,用于控制取值范围。根据式(3)可知, R_{comp} 是关于该节点与汇聚点距离成正比的函数,候选簇首距汇聚点距离减小,其竞争半径随之减小,目的是让距离汇聚点较近的簇规模更小,每个簇内的簇首接收簇内成员的数据耗能少,这样可以留更多的能量来承担其来自他簇首的数据转发任务,以缓解能量空洞问题^[2]。候选簇首节点的竞争范围在 $(1 - c)R_{comp}^0$ 到 R_{comp}^0 之间变化。

3.1.2 RCS 竞选簇首算法

下面给出任意节点 s_i 在簇首竞选过程中执行的算法伪代码。

算法 RCS 的竞选簇首算法。

输入 候选簇首 ID, R_{comp}, E_{res} ;

输出 簇首 s_i 。

- 1) $\mu \leftarrow RAND(0,1)$
- 2) if $\mu < T$ then
- 3) be TentativeNode \leftarrow TRUE
- 4) end if
- 5) if be TentativeNode = TRUE then
- 6) Broadcast Compete_Head_Msg(ID, R_{comp}, E_{res})


```

7) else
8) sleep
9) end if
10) on receiving a Compete_Head_Msg from TentativeNode  $s_j$ 
11) if  $d(s_i, s_j) < s_j \cdot R_{comp}$  or  $d(s_i, s_j) < s_i \cdot R_{comp}$  then
12) add  $s_j$  to  $s_i$  neighbor set  $s_i \cdot Neb$ 
13) end if
For every tentative node  $s_i$ 
14) if  $E_{res}^i \geq E_n$ 
15) compute  $t$  according to Eq. (6)
16) else
17)  $s_i$  give up the competition and become an ordinary node
18) end if
19) while the timer  $t_0$  is not expired
20) if CurrentTime  $< t$ 
21) if heard SUCCESS_MSG from  $s_j \cdot Neb$ 
22) give up the competition and stop the timer  $t$ 
23) end if
24) else if CurrentTime  $= t$ 
25) Broadcast SUCCESS_MSG(ID)
26) end if
27) end while

```

算法首先依概率在各子区中出部分节点成为候选簇首来参与竞选。在第5)~9)行, 候选簇首节点广播包括自身ID、竞争半径 R_{comp} 和剩余能量 E_{res} 的 COMPETE_HEAD_MSG 消息, 而普通节点则进入休眠状态直到簇首竞选结束。在第10)~13)行, 候选簇首接收这些消息后更新其邻居节点表。

我们在相关工作中指出, EEUC 等分簇算法没有考虑到节点分布密集情况, 竞选出的簇首分布可能不理想。此外, 候选簇首节点在竞争簇首时需要广播和接收大量消息, 会带来不少的能量消耗。所以, 本文在第一阶段网络划分后将距离近的节点划分到一个区域控制簇首的分布, 此时各子区内节点相对集中、密度大, 在这样的条件下, 进而利用定时广播, 在不均匀分簇的基础上设置一个时间阈值 t 来控制候选簇首节点的比例, 即无需让每个节点都成为候选簇首, 从而减少通信成本和降低节点的能耗。

每个候选簇首节点需计算其竞争半径内节点的平均剩余能量和到汇聚点的平均距离, 见式(4)和式(5):

$$E_n = \sum_{j=1}^m E_{res}^j / m \quad (4)$$

$$D_n = \left(\sum_{j=1}^m d(s_i, sk) \right) / m \quad (5)$$

由此计算出时间计数器 t 的值, 见式(6):

$$t = k \times t_0 \times \frac{E_n}{E_{res}^i} \times \frac{d(s_i, sk)}{D_n} \quad (6)$$

其中: k 是均匀分布在(0,1)内的随机数, 以减小广播消息时间冲突的可能性; t_0 为预先定义的簇首竞选所需的时间; E_{res}^i 是节点 s_i 的剩余能量; E_n 是节点 s_i 邻居节点的平均剩余能量。通过式(6)可以看出, 目的是让更靠近汇聚点, 具有更多剩余能量的候选节点竞争等待的时间更短, 成为簇首的概率更大, 从而延长了那些能量较少且距离汇聚点远的节点的存活时间。若两个候选簇首节点的 t 值相等, 则随机选取一个作为最终簇首节点。如果 $E_{res}^i < E_n$, 节点 s_i 放弃竞争簇首, 如 RCS 的竞选簇首算法第14)~18)行所示。

在时间 t 内, 如果候选簇首节点 s_i 没有收到来自其邻居节

点发送的竞选簇首成功的 SUCCESS_MSG 消息, 该节点则最终赢得竞选, 成为簇首, 并要发送 SUCCESS_MSG 消息通知其邻居节点; 否则选举失败并退出竞选, 如 RCS 的竞选簇首算法中19)~27)行所示。

簇首选举完成后, 普通节点从睡眠状态唤醒, 而簇首则广播竞选获胜的消息 CH_ADV_MSG。普通节点根据其接收的消息的信号强度最大即最近的加入, 并发送 JOIN_CLUSTER_MSG 消息通知该簇首, 至此网络分簇策略完成。

3.2 基于能耗的簇间路由

以 Dijkstra 为代表的最短路径算法需要知道全部顶点信息, 而无线传感器节点存储空间有限, 只能存储局部拓扑信息, 所以不适合在传感器中使用。本文通过局部信息构建基于网络能量代价的最小生成树, 综合考虑任意两个簇首节点的通信能耗、节点剩余能量和与 Sink 节点的距离合理有效地进行多跳路由。由于数据融合的能量消耗相对于传输能耗的值很小, 在建立最小生成树的时候不作主要影响因素考虑。簇首通信阶段引用文献[9]中的阈值 $Dist_Max$, 即簇首到 Sink 节点的最大距离。若 $d(s_j, sk)$ 小于 $Dist_Max$ 则直接与 Sink 节点通信, 否则将使用多跳路由传数据给 Sink 节点。经过上述分簇策略后, 簇首节点和 Sink 节点组成的网络可抽象为一个无向加权图, 由簇首构成点集合, 边集合由加权值网络能耗代价构成, 其定义如下。

定义2 网络能耗代价。若簇首 s_i 选取簇首 s_j 为其下一跳候选节点, 则这两个节点的网络能耗代价 (Network Energy Cost, NEC) 为:

$$NEC(i, j) = E_{ij} \times \frac{E_0}{E_{res}^j} \times \frac{d(s_i, sk)}{d_{max}} \quad (7)$$

其中 E_{ij} 表示节点 s_i 和 s_j 直接通信的能量消耗, 为:

$$E_{ij} = E_{Tx}(l, d) + E_{Rx}(l, d) = 2lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d^\alpha \quad (8)$$

其中: E_{res}^j 表示候选簇首 s_j 的剩余能量; $d(s_i, sk)$ 表示父节点 s_i 到汇聚点的距离。所以, 节点 s_i 选择节点 s_j 作为其父节点的策略是选择网络能耗代价最小, 即 $NEC(i, j)$ 的值最小:

$$CF_i = \text{Min } NEC(i, j) \quad (9)$$

若节点 s_i 的邻居信息表为空, 说明此簇首周围没有其他簇首存在, 这种情况会出现在网络运行到后期, 大部分节点已经死亡的情况下, 此时, 簇首需将数据直接传输给汇聚点。通过式(9)可以看出, $NEC(i, j)$ 充分考虑了两节点间通信的能量消耗和邻居节点的剩余能量以及到汇聚点的距离状况, 通过对这3个因素的综合考虑, 选择最小的 $NEC(i, j)$, 使得在发送能耗较小的情况下, 距离汇聚点较近并且剩余能量充足的节点优先成为父节点。按照以上策略确定路由方式之后, 簇首生成一棵以汇聚点为根的树, 数据沿着汇聚点的方向传输。

此外, 在第一阶段网络划分中, 因为采用层次聚类方法 AGNES 时设定阈值 M , 当被聚类的节点数占总数的比值为 M 时, 聚类停止, 可能会产生少数离群点, 即会有少数稀疏的感知节点没有参加簇首竞选, 这也符合我们提出的不让离群相对远的节点成为簇首的策略。针对这小部分的感知节点, 在数据传输过程中, 选择距其最近的簇并将数据传输给区内与其最近的节点或是直接传给汇聚节点 Sink。

4 仿真与分析

为了比较本文提出的策略 RCS 以及 LEACH、HEED、

EEUC 的性能,本文在 Matlab 环境下对其进行仿真实验,从簇首选取数量、网络能量消耗、网络生命周期以及节点能量均衡性 4 个方面进行比较分析。算法的工作方式是在监测区域周期性监测对象将数据传输给汇聚点 Sink 进行监控与信息采集。仿真场景为在 $300\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的监测区域内,随机生成 400 个传感器节点,成不均匀分布,初始能量为 0.5 J 。网络中所有节点包括汇聚点位置固定,不发生移动。表 2 为相关仿真参数。

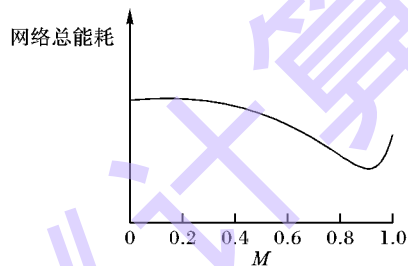
表 2 仿真相关参数

参数	值
节点数目 n	400
传感器初始能量 E_0	0.5 J
E_{elec}	50 nJ/b
ϵ_{fs}	$10\text{ pJ}/(\text{b} \cdot \text{m}^3)$
ϵ_{mp}	$0.0013\text{ pJ}/(\text{b} \cdot \text{m}^3)$
E_{DA}	$5\text{ nJ}/(\text{b} \cdot \text{signal})$
d_0	87 m
数据包大小	4000 b

4.1 参数分析

本文提出的 RCS 分簇策略是在 EEUC 算法基础上进行对生命周期的优化。文献[8]指出,簇首数目是由参数 R_c^0 和 c 共同决定,并经实验证明在 $c = 0.5$ 时,网络生命周期最长。当 c 固定时,簇首数目与 R_c^0 成反比。本文中取 $c = 0.5$, $R_c^0 = 90\text{ m}$ 。

此外,对 M 值的选取可以进行实验分析,见图 3。

图 3 M 的取值对于能耗的影响

由实验结果可知,当 M 值为 0.9 时,网络总体能耗最低,因而在其他实验中, M 的取值均设置为 0.9。且当 $M = 0$ 时,即对节点不进行聚类操作,直接对所有节点进行操作划分子区。此方法能耗较高,因而验证了本文对节点聚类划分网络,进而选举簇首这一方法的正确性。而当 $M > 0.9$ 时,能耗反而升高,此时离群点被过度拟合。因此在对节点进行聚类时,应合理设置阈值,避免离群点的过拟合。

4.2 簇首数量对比

为了说明 RCS 分簇策略的稳定性,将 RCS 与 LEACH、HEED 协议生成的簇首数量进行比较。在网络拓扑固定的情况下,一个稳定的分簇协议应生成数量较一致的簇首来优化网络的能量消耗。文献[19]推导了单跳网络中最优簇首数量的近似计算公式。从每种分簇协议的模拟过程中随机选出 100 轮,在没有任何节点死亡的情况下,统计所生成的簇首个数的分布情况,结果如图 4 所示。由图可见,每种协议生成的簇首的数量都有一个期望值,它是协议在此场景下最优的簇首数量。LEACH 的簇首数量的波动范围较大,原因是 LEACH 单纯性地采用随机数与阈值的机制产生簇首,因此簇

首的数量变化比较明显。HEED 与 RCS 的簇首数量则集中于期望值,这是因为都采用候选簇首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量。但 RCS 生成的簇首数目多于 HEED,这是因为 RCS 采用不均匀分簇在靠近汇聚点的区域里能产生更多的簇。总的来说,RCS 通过简单的竞争算法生成了数量稳定的簇,可靠性好。

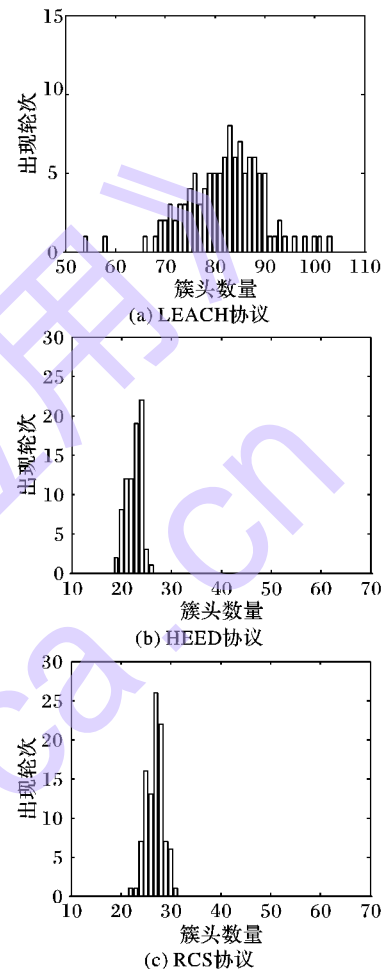


图 4 3 种协议生成的簇首数量分布

4.3 网络生命周期对比

网络生命周期可以用存活节点数与轮数的关系表示。从簇首选择阶段到周期循环阶段为一轮,从第一个感知节点死亡到所有节点全部死亡的轮数可以反映出网络的能量消耗均衡情况,轮数越多说明网络的能量使用越高效。如图 5 中所示,HEED 的第一个节点死亡时间早于 LEACH,但最后一个节点的死亡时间却比 LEACH 晚,说明 HEED 没有较好均衡网络节点的能量消耗,导致有些节点过早死亡。EEUC 出现第一个节点死亡的时间比 RCS 早,这表明 EEUC 路由协议的网络生命周期比 RCS 短,主要原因是后者不仅考虑节点剩余能量,还考虑感知节点分布密集程度以及节点与汇聚点的距离来选举簇首,因此,较弱的节点能持续时间更长,从而延长了网络寿命。与 LEACH、HEED、EEUC 协议比较,RCS 生命周期分别延长了 38%、15%、3.7%。如图中所示,EEUC 从节点开始死亡(640 轮)到全部死亡(800 轮)大概能持续 160 轮次,而 RCS 从第一个节点死亡(692 轮)到最后一个节点死亡(830 轮)大概能持续 130 轮次,因此后者在能耗均衡上有较好表现。

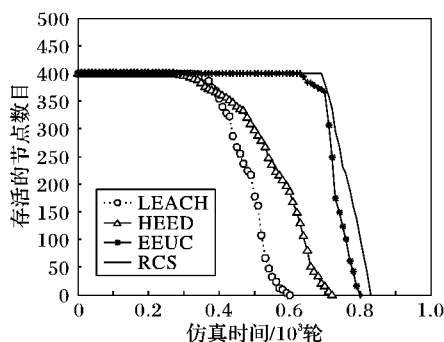


图5 各种分簇协议的网络生命周期

4.4 网络总体能量对比

图6所示为4种分簇协议的网络能量总耗随时间变化图,同时为了测量的准确性,仿真实验舍弃存活节点低于20个的情况,即当存活节点低于20个时就不再测量网络中整体能量消耗。图6中,当网络运行200轮时,RCS的网络总能量还有119.616 J,分别比LEACH、EEUC多67.628 J、4.768 J;当网络运行600轮时,LEACH算法生命周期已结束,网络总能量耗尽,此时RCS网络总能量剩余最多,为19.904 J,而HEED、EEUC的网络总能量只有0.896 J、12.704 J;当网络运行800轮时,HEED、EEUC生命周期均已结束,而RCS的网络总能量还有3.456 J。通过仿真结果表明,本文分布式区域分簇策略RCS的网络能量总消耗均低于LEACH、EEUC、HEED算法,这是因为本文方法先采用聚类算法将网络划分成区,能产生最优的分簇结构,使簇首节点在网络中分布均匀而减少了能耗损失,同时采用不均匀分簇策略缓解能量空洞问题;并且在簇首选取时综合考虑了节点的剩余能量和节点与汇聚点的距离,从而可以均衡节点的能耗和减少簇内通信消耗。

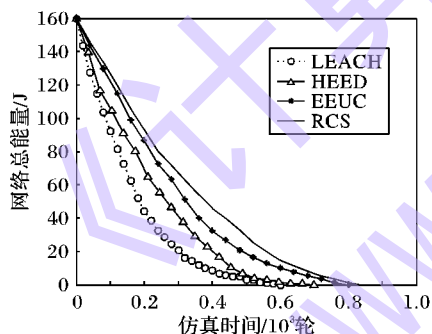


图6 网络总能量

4.5 节点能量均衡对比

图7和图8显示了在随机选取的10轮中,4种分簇协议在能量均衡方面的性能,分别根据网络的能量均值和能量方差函数式(10)和式(11)求得:

$$Avg_E(t) = \sum_{i=1}^N E_i(t) / N \quad (10)$$

$$D_E(t) = \left(\sum_{i=1}^N [E_i(t) - Avg_E(t)]^2 \right) / N \quad (11)$$

图7中,RCS的簇首节点能耗均值一直比LEACH、HEED和EEUC低,分别减少45.1%、36.8%、2.4%,说明RCS能够有效节约节点能量。图8为4种分簇协议在节点能量方差上随时间变化的曲线。从图中可以看出,RCS的感知节点能量方差变化不大,一直很低,这表明RCS分簇策略也能有效地均衡网络中感知节点的能量。仿真结果表明,RCS的能量

均衡性能最好。

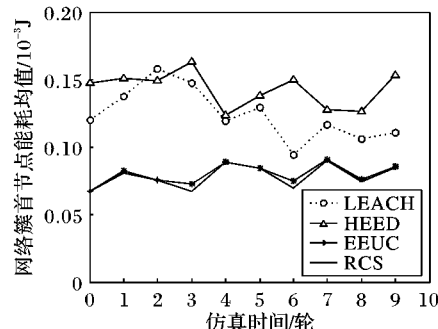


图7 网络簇首节点能耗均值的变化曲线

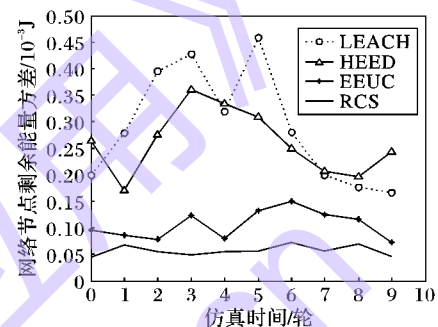


图8 网络节点剩余能量方差的变化曲线

5 结语

如何提高无线传感器网络的生存周期一直是研究的重点,特别是面向物联网的应用中更加重要。基于较大规模无线传感器网络呈现出的地理区域广、传感器节点数量多且分布不均等问题,本文从实现节点的能耗均衡方面来分析,提出一种基于区域分簇的大规模无线传感器网络生命周期优化策略RCS,利用层次聚类算法将网络划区产生较优的分簇结构,减少网络通信;并将不均匀分簇和簇间多跳路由两者有机结合。实验结果表明,RCS能够有效节约感知节点能量,均衡了网络能耗,延长了网络生存周期。

参考文献:

- [1] HU Y, SUN Y, YIN B. Information sensing and interaction technology in Internet of things[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(6): 1147-1163. (胡永利, 孙艳丰, 尹宝才. 物联网信息感知与交互技术[J]. 计算机学报, 2012, 35(6): 1147-1163.)
- [2] WU X, CHEN G. The energy hole problem of nonuniform node wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2008, 31(2): 253-261. (吴小兵, 陈贵海. 无线传感器网络中节点非均匀分布的能量空洞问题[J]. 计算机学报, 2008, 31(2): 253-261.)
- [3] LIU B, XU P, PEI D, et al. Survey on node deployment algorithm in wireless sensor networks[J]. Sensor World, 2009, 15(8): 10-14. (刘彬, 许屏, 裴大刚, 等. 无线传感器网络的节点部署方法的研究进展[J]. 传感器世界, 2009, 15(8): 10-14.)
- [4] ZHAO X. A signal mechanism based energy-aware geographic routing algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(5): 965-973. (赵湘宁. 一种基于信号机制的能量感知地理路由算法[J]. 电子学报, 2015, 43(5): 965-973.)
- [5] GUO J, HAN Y. Load balancing algorithm for non-uniform clustering with distributed hierarchical structure[J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(2): 332-335. (郭晋秦, 韩焱. 基于分

- 布式层次化结构的非均匀聚类负载均衡算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(2): 332–335.)
- [6] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]// Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Piscataway: IEEE, 2000: 1–10.
- [7] MHATRE V, ROSENBERG C. Design guidelines for wireless sensor networks: communication, clustering and aggregation[J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(1): 45–63.
- [8] YOUNIS O, MEMBER S, FAHMY S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for Ad Hoc sensor networks[C]// IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366–379.
- [9] SORO S, HEINZELMAN W B. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering[C]// Proceedings of the 19th International Parallel and Distributed Processing Symposium. Piscataway: IEEE, 2005: 8.
- [10] YE M, LI C, CHEN G, *et al.* EECS: an energy-efficient clustering scheme in wireless sensor networks[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2007, 3(2/3): 535–540.
- [11] LI C, CHEN G, YE M, *et al.* An uneven cluster-based routing protocol for wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(1): 27–36. (李成法, 陈贵海, 叶懋, 等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机学报, 2007, 30(1): 27–36.)
- [12] MIAO C, CHEN Q, CAO J, *et al.* Energy balanced uneven clustering algorithm based on ant colony for wireless sensor network[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(12): 3410–3414. (缪聪聪 陈庆奎 曹剑炜, 等. 基于蚁群的无线传感器网络能量均衡非均匀分簇路由算法[J]. 计算机应用, 2013, 33(12): 3410–3414.)
- [13] DONG R, MA Z, GUO Y, *et al.* A Markov game theory-based energy balance routing algorithm[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(7): 1500–1508. (董荣胜, 马争先, 郭云川, 等. 一种基于马尔可夫博弈的能量均衡路由算法[J]. 计算机学报, 2013, 36(7): 1500–1508.)
- [14] KONG Y, YAO J, ZHANG M. QoS multicast routing optimization algorithm in Ad Hoc networks based on MMAS with lifetime estimation[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2015, 36(1): 44–48. (孔宇彦, 姚金涛, 张明武. Ad Hoc 网络基于寿命估算 MMAS 的 QoS 组播路由优化算法[J]. 小型微型计算机系统, 2015, 36(1): 44–48.)
- [15] ZHAO T, GUO T, YANG W. Energy balancing routing model and its algorithm in wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2009, 20(11): 3023–3033. (赵彤, 郭田德, 杨文国. 无线传感器网络能耗均衡路由模型及算法[J]. 软件学报, 2009, 20(11): 3023–3033.)
- [16] HAN J W, KAMBER M. Data mining: concepts and techniques [M]. 2nd ed. FAN M, MENG X, translated. Beijing: China Machine Press, 2007: 263–266. (HAN J W, KAMBER M. 数据挖掘: 概念与技术[M]. 2 版. 范明, 孟小峰, 译. 北京: 机械工业出版社, 2007: 263–266.)
- [17] LIAN J, NAIK K, AGNEW G B. Data capacity improvement of wireless sensor networks using non-uniform sensor distribution[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2006, 2(2): 121–145.
- [18] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660–670.

(上接第 3030 页)

运算类应用时,在独立主机上性能更好;在运行 FTP 类应用时,如更重视 CPU 性能则适合独立主机,如更重视内存性能;则适合迁移到云上。

下一步的工作是基于更全面的测试集,进而对适合云迁移的应用进行归纳和分类,建立数学模型,为计划云迁移的用户提供更系统的参考。

参考文献:

- [1] ACETO G, BOTTA A, DONATO W D, *et al.* Cloud monitoring: a survey[J]. Computer Networks, 2013, 57(9): 2093–2115.
- [2] FATEMA K, EMEAKAROKA V C, HEALY P D, *et al.* A survey of cloud monitoring tools: taxonomy, capabilities and objectives[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2014, 74(10): 2918–2933.
- [3] KHAJEH-HOSSEINI A, GREENWOOD D, SOMMERVILLE I. Cloud migration: a case study of migrating an enterprise it system to IaaS[C]// Proceedings of the 2010 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing. Piscataway: IEEE, 2010: 450–457.
- [4] LIU Q, LIU L, BI X. Discussion of cloud migration for service platform[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2012, 25(4): 35–38. (刘芹, 刘玲, 毕晓飞. 业务平台云迁移方案的探讨[J]. 电信工程技术与标准化, 2012, 25(4): 35–38.)
- [5] SHEN Q, DONG B, XIAO D. Design and implementation of cloud monitoring system based on server clusters[J]. Computer Engineering and Science, 2012, 34(10): 73–77. (沈青, 董波, 肖德宝. 基于服务器集群的云监控系统设计与实现[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(10): 73–77.)
- [6] Nagios[EB/OL]. [2015-01-22]. <http://www.nagios.org>.
- [7] ZHANG Z. The application research of resource monitoring under cloud computing environment[D]. Beijing: Northern China University of Technology, 2013: 16–22. (张仲妹. 云计算环境下的资源监控应用研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2013: 16–22.)
- [8] KUMAR R, GUPTA N, CHARU S, *et al.* Open source solution for cloud computing platform using OpenStack[J]. International Journal of Computer Science and Mobile Computing, 2014, 3(5): 89–98.
- [9] WEN X, GU G, LI Q, *et al.* Comparison of open-source cloud management platforms: OpenStack and OpenNebula[C]// Proceedings of the 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Piscataway: IEEE, 2012: 2457–2461.
- [10] CHEN B, CHENG Z. Cloud computing and OpenStack[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry Press, 2013: 4–25. (陈伯龙, 程志鹏. 云计算与 OpenStack[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 4–25.)
- [11] WANG F. The construction and realization monitoring platform of application servers based on Nagios[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2010, 29(12): 51–57. (王帆. 基于 Nagios 的服务器监控平台构建与实现[J]. 实验室研究和探索, 2010, 29(12): 51–57.)